



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

**VYSOKOFREKVENČNÍ JEDNOTKA PRO PŘENOSNOU
MONITOROVACÍ STANICI**

RF UNIT FOR PORTABLE MONITORING STATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Lukáš Rokos

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Filip Záplata, Ph.D.

BRNO 2019

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektronika a sdělovací technika**

Ústav radioelektroniky

Student: Bc. Lukáš Rokos

ID: 159626

Ročník: 2

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Vysokofrekvenční jednotka pro přenosnou monitorovací stanici

POKyny PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte principy a techniky monitoringu rádiového spektra a seznámte se s metodami používanými Českým telekomunikačním úřadem. Proveďte analýzu a systémový návrh řešení vysokofrekvenční části přenosné monitorovací stanice pokrývající kmitočtový rozsah od 9 kHz do 6 GHz, přičemž uvažujte vhodné rozdělení do kmitočtových subpásů. Uvažujte připojení jednotky k SDR monitorovacímu přijímači. Navrhněte vhodné antény pro jednotlivá subpásma buď komerčně dostupné, nebo s vlastním řešením. Dále navrhněte soubor filtrů: dolní propust do 1 GHz, horní propust nad 1 GHz a pásmové zádrže pro pásma VKV-FM a LTE800/GSM900. Dále zvolte vhodný koaxiální přepínač pro jednotlivá subpásma a navrhněte jeho ovládání přes vhodné datové rozhraní.

Navrhněte rovněž aplikaci vhodného rotátoru s ovládáním přes datové rozhraní. Řešení jednotlivých komponent podpořte simulacemi a navrhněte desky plošných spojů. Navržený vysokofrekvenční subsystém realizujte a proveďte měření parametrů jednotlivých komponentů i celé jednotky včetně řízení z počítače (např. přes terminál). Sestavte uživatelský manuál k navržené jednotce.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] PRAKASH, B. Modern RF and Microwave Filter Design. Norwood: Artech House, 2016.
- [2] Český telekomunikační úřad. Národní kmitočtová tabulka. 2017.

Termín zadání: 4.2.2019

Termín odevzdání: 16.5.2019

Vedoucí práce: Ing. Filip Záplata, Ph.D.

Konzultant:

prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Práce popisuje metody pro monitorování spektra používané Českým telekomunikačním úřadem, návrh vysokofrekvenční jednotky pro přenosnou monitorovací stanici a možnosti jejího využití. Vysokofrekvenční jednotka se skládá z několika samostatných zařízení ve formě bloků pospojovaných do výsledného celku. Dílčí zařízení jako anténa, rotátor, ovládací jednotka rotátoru, koaxiální přepínače, zesilovač a atenuátor jsou na základě definovaných parametrů zvolena jako komerčně dostupná a v práci je popsán jejich výběr. Dílčími zařízeními vlastního návrhu jsou filtry, zdroj napájecího napětí a ovládací jednotka vysokofrekvenční jednotky, návrh je v práci popsán. Vysokofrekvenční jednotka je ovládána prostřednictvím PC a grafického uživatelského rozhraní v monitorovacím softwaru.

KLÍČOVÁ SLOVA

Monitorování spektra, Český telekomunikační úřad, přenosná monitorovací stanice, prutová anténa, dipól, logaritmicko-periodická anténa, koaxiální přepínač, zesilovač, atenuátor, filtr, anténní rotátor.

ABSTRACT

The thesis describes methods for spectrum monitoring, which are used by the Czech telecommunication office. The thesis describes a design of an RF unit for a portable monitoring station and its potential use. The RF unit consists of several devices, which are connected. Devices like an antenna, a rotator, a rotator control unit, coaxial switches, an amplifier and attenuator were chosen as commercially available devices. It is also described, why were these devices chosen. Other devices such as filters, a control unit for the RF unit and a power supply were designed. The RF unit is controlled by a computer. A software for spectrum monitoring contains a graphical user interface for the RF unit control.

KEYWORDS

Spectrum monitoring, the Czech telecommunication office, portable monitoring station, whip antenna, logarithmic-periodic antenna, coaxial switch, amplifier, attenuator, filter, antenna rotator.

ROKOS, L. *Vysokofrekvenční jednotka pro přenosnou monitorovací stanici*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2019. 162 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Filip Záplata, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma Vysokofrekvenční jednotka pro přenosnou monitorovací stanici jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Filipu Záplatovi, Ph.D za pomoc a rady při zpracování mé diplomové práce. Dále děkuji panu Tomáši Víkovi a Ing. Karlu Holkovi za konzultace, množství podnětných návrhů a trpělivost.

OBSAH

Seznam obrázků	vii
Seznam tabulek	xiii
Úvod	1
1 Monitorování spektra	2
1.1 Monitorování spektra Českým telekomunikačním úřadem.....	3
2 Systémový návrh zařízení	4
2.1 Rozdělení do kmitočtových subpásem a výběr antén	7
2.2 Koaxiální přepínače.....	12
2.3 Sada filtrů	19
2.4 Zesilovač a atenuátor.....	43
2.5 Rotátor	48
2.6 Ovládání VF jednotky	52
2.7 Napájení.....	55
3 Realizace a výběr konkrétních zařízení	58
3.1 Koaxiální přepínače.....	58
3.2 Sada filtrů	66
3.3 Zesilovač.....	83
3.4 Atenuátor	86
3.5 Ovládání VF jednotky	89
3.6 Napájení.....	93
3.7 Rotátor a jeho ovládání.....	102
3.8 Měření, zpracování a zobrazení naměřených dat.....	105
3.9 Celková konstrukce zařízení.....	108
3.10 Měření parametrů VF jednotky.....	111
4 Závěr	114
Literatura	117
Seznam symbolů, veličin a zkratk	119

A	Napájení	124
A.1	Zdroj 5 V, 12 V, 24 V a 28 V – obvodové zapojení	124
A.2	Zdroj 5 V, 12 V, 24 V a 28 V – deska plošného spoje – bottom.....	125
A.3	Zdroj 5 V, 12 V, 24 V a 28 V – osazovací výkres – bottom	126
A.4	Zdroj 5 V, 12 V, 24 V a 28 V – osazovací výkres – top	127
A.5	Zdroj 5 V – obvodové zapojení	128
A.6	Zdroj 5 V – deska plošného spoje – bottom	129
A.7	Zdroj 5 V – osazovací výkres – bottom	129
A.8	Zdroj 5 V – osazovací výkres – top	129
A.9	Zdroj $\pm 3,3$ V – obvodové zapojení	130
A.10	Zdroj $\pm 3,3$ V – deska plošného spoje – bottom	131
A.11	Zdroj $\pm 3,3$ V – osazovací výkres – bottom	131
A.12	Zdroj $\pm 3,3$ V – osazovací výkres – top	131
A.13	Svorkovnice – obvodové zapojení	132
A.14	Svorkovnice – deska plošného spoje – bottom.....	133
A.15	Svorkovnice – osazovací výkres – top	133
B	Ovládání	134
B.1	Ovládací jednotka – obvodové zapojení.....	134
B.2	Ovládací jednotka – deska plošného spoje – bottom	135
B.3	Ovládací jednotka – deska plošného spoje – top	135
B.4	Ovládací jednotka – osazovací výkres – bottom.....	136
B.5	Ovládací jednotka – osazovací výkres – top.....	136
B.6	Seznam příkazů pro ovládání rotátoru.....	137
B.7	Seznam příkazů pro ovládání VF jednotky	138
C	Úprava a vedení signálu	139
C.1	Konektorová deska pro koaxiální přepínač Teledyne – obvodové zapojení	139
C.2	Konektorová deska pro koaxiální přepínač Teledyne – deska plošného spoje – bottom	140
C.3	Konektorová deska pro koaxiální přepínač Teledyne – osazovací výkres – top.....	140
C.4	Konektorová deska pro koaxiální přepínač TEleRel – obvodové zapojení	141

C.5	Konektorová deska pro koaxiální přepínač TEleRel – deska plošného spoje – bottom	142
C.6	Konektorová deska pro koaxiální přepínač TEleRel – osazovací výkres – top	142
C.7	Zesilovač – obvodové zapojení.....	143
C.8	Zesilovač – deska plošného spoje – bottom	144
C.9	Zesilovač – osazovací výkres – bottom.....	144
C.10	Zesilovač – osazovací výkres – top.....	144
C.11	Pásmová zádrž VKV-FM – obvodové zapojení	145
C.12	Pásmová zádrž VKV-FM – deska plošného spoje – bottom	146
C.13	Pásmová zádrž VKV-FM – deska plošného spoje – top	146
C.14	Pásmová zádrž VKV-FM – osazovací výkres – top	146
C.15	Pásmová zádrž LTE 800 a GSM 900 – obvodové zapojení	147
C.16	Pásmová zádrž LTE 800 a GSM 900 – deska plošného spoje – bottom....	148
C.17	Pásmová zádrž LTE 800 a GSM 900 – deska plošného spoje – top.....	148
C.18	Pásmová zádrž LTE 800 a GSM 900 – osazovací výkres – top	148
D	Mechanické a konstrukční části	149
D.1	Přídavné chladiče pro napájecí zdroj 5 V, 12 V, 24 V a 28 V.....	149
D.2	Krabice pro filtr dolní propust 1 GHz	149
D.3	Krabice pro filtr horní propust 1,1 GHz	149
D.4	Krabice pro filtr pásmová zádrž LTE 800 a GSM 900	149
E	Seznam součástek	154
E.1	Napájení.....	154
E.2	Ovládací jednotka.....	157
E.3	Zesilovač.....	158
E.4	Konektorové desky pro koaxiální přepínače	158
E.5	Filtry	159
E.6	Ostatní.....	160
F	Použité měřicí přístroje a pomůcky	161

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1	Architektura automatizovaného systému monitorování kmitočtového spektra (ASMKS) [3].	3
Obrázek 2.1	Blokové schéma přenosné stanice pro monitorování spektra.....	4
Obrázek 2.2	Blokové schéma vysokofrekvenční jednotky monitorovací stanice.	5
Obrázek 2.3	Blokové schéma vysokofrekvenční jednotky monitorovací stanice, varianta pro dlouhodobé monitorování spektra.	6
Obrázek 2.4	Blokové schéma vysokofrekvenční jednotky monitorovací stanice, varianta pro krátkodobé monitorování předem blíže určeného pásma.	7
Obrázek 2.5	Aktivní prutová anténa Rohde & Schwarz HE010E [4].	8
Obrázek 2.6	Pasivní dipól Rohde & Schwarz HK309 [4].....	9
Obrázek 2.7	Diskónová anténa (obrázek je pouze ilustrační) [5].....	9
Obrázek 2.8	Logaritmicko-periodická anténa Rohde & Schwarz HL223 [4].....	10
Obrázek 2.9	Logaritmicko-periodická anténa Rohde & Schwarz HL040E [4].	11
Obrázek 2.10	Elektromechanický koaxiální přepínač TEleRel SP6T [6].....	15
Obrázek 2.11	Přepínač ve formě integrovaného obvodu Analog Devices ADRF5040 umístěný na vývojové desce [7].....	16
Obrázek 2.12	Průběh <i>vložného útlumu</i> filtru při použití Chebyshevovy aproximace [8].	20
Obrázek 2.13	Schéma příčkového filtru pro Chebyshevovu aproximaci (a) a jeho duálního ekvivalentu (b) pro sudý a lichý řád [8].....	21
Obrázek 2.14	Průběh <i>vložného útlumu</i> filtru při použití eliptické aproximace [8].	22
Obrázek 2.15	Schéma příčkového filtru pro eliptickou aproximaci (a) a jeho duálního ekvivalentu (b) pro sudý a lichý řád [8].	22
Obrázek 2.16	Schéma filtru dolní propust 1 GHz 7. řádu při použití eliptické aproximace.....	24
Obrázek 2.17	Struktura mikropáskového filtru dolní propust 1 GHz 7. řádu s rozměry jednotlivých úseků (neodpovídá skutečné velikosti).	25
Obrázek 2.18	Graf průběhu <i>přenosu</i> filtru dolní propust 1 GHz 7. řádu v závislosti na kmitočtu pro mikropáskový návrh v CST.	25
Obrázek 2.19	Schéma filtru dolní propust 1 GHz 11. řádu při použití eliptické aproximace (vytvořeno v nástroji Nuhertz Filter Solutions).	26
Obrázek 2.20	Struktura mikropáskového filtru dolní propust 1 GHz 11. řádu s rozměry jednotlivých úseků (neodpovídá skutečné velikosti).	26

Obrázek 2.21	Graf průběhu <i>přenosu</i> filtru dolní propust 1 GHz 11. řádu v závislosti na kmitočtu, a to pro ideální L a C strukturu navrženou v Nuhertz Filter Solutions a pro mikropáskový návrh v CST.....	27
Obrázek 2.22	Schéma filtru dolní propust 2,5 GHz 7. řádu při použití eliptické aproximace.....	28
Obrázek 2.23	Struktura mikropáskového filtru dolní propust 2,5 GHz 7. řádu s rozměry jednotlivých úseků (neodpovídá skutečné velikosti).	28
Obrázek 2.24	Graf průběhu <i>přenosu</i> filtru dolní propust 2,5 GHz 7. řádu v závislosti na kmitočtu pro mikropáskový návrh v CST.	29
Obrázek 2.25	Schéma filtru dolní propust 2,5 GHz 11. řádu při použití eliptické aproximace (vytvořeno v nástroji Nuhertz Filter Solutions).	29
Obrázek 2.26	Struktura mikropáskového filtru dolní propust 2,5 GHz 11. řádu s rozměry jednotlivých úseků (neodpovídá skutečné velikosti).	30
Obrázek 2.27	Graf průběhu <i>přenosu</i> filtru dolní propust 2,5 GHz 11. řádu v závislosti na kmitočtu, a to pro ideální L a C strukturu navrženou v Nuhertz Filter Solutions a pro mikropáskový návrh v CST.....	30
Obrázek 2.28	Graf průběhu <i>přenosu</i> kaskády filtrů dolní propust v závislosti na kmitočtu pro mikropáskový návrh v CST.....	32
Obrázek 2.29	Graf průběhu <i>PSV</i> kaskády filtrů dolní propust v závislosti na kmitočtu pro mikropáskový návrh v CST.....	32
Obrázek 2.30	Schéma mikropáskového filtru horní propust [8].	33
Obrázek 2.31	Typická přenosová charakteristika mikropáskového filtru horní propust [8].	34
Obrázek 2.32	Struktura mikropáskového filtru horní propust 1,1 GHz s rozměry jednotlivých úseků (neodpovídá skutečné velikosti).	36
Obrázek 2.33	Graf průběhu <i>přenosu</i> a <i>PSV</i> filtru horní propust 1,1 GHz v závislosti na kmitočtu pro mikropáskový návrh v CST.	36
Obrázek 2.34	První (1) a druhé (2) možné zapojení LC filtru typu pásmová zádrž 9. řádu pro FM pásmo při použití Chebyshevovy aproximace [9].	38
Obrázek 2.35	Graf průběhu <i>přenosu</i> a <i>PSV</i> pásmové zádrže FM pásma v závislosti na kmitočtu pro Chebyshevovu aproximaci.	38
Obrázek 2.36	První (1) a druhé (2) možné zapojení LC filtru typu pásmová zádrž 5. řádu pro FM pásmo při použití eliptické aproximace [9].	39
Obrázek 2.37	Graf průběhu <i>přenosu</i> a <i>PSV</i> pásmové zádrže FM pásma v závislosti na kmitočtu pro eliptickou aproximaci.	39
Obrázek 2.38	První (1) a druhé (2) možné zapojení LC filtru typu pásmová zádrž 9. řádu pro LTE 800 a GSM 900 pásmo při použití Chebyshevovy aproximace [9].	41
Obrázek 2.39	Graf průběhu <i>přenosu</i> a <i>PSV</i> pásmové zádrže LTE 800 a GSM 900 pásma v závislosti na kmitočtu pro Chebyshevovu aproximaci.	41

Obrázek 2.40	Zapojení LC filtru typu pásmová zádrž 5. řádu pro LTE 800 a GSM 900 pásmo při použití eliptické aproximace [9].	42
Obrázek 2.41	Graf průběhu <i>přenosu</i> a <i>PSV</i> pásmové zádrže LTE 800 a GSM 900 pásma v závislosti na kmitočtu pro eliptickou aproximaci.	42
Obrázek 2.42	Bod zahrazení pro intermodulační produkty 3. řádu a bod jednodéciblové komprese [11].	44
Obrázek 2.43	Širokopásmový zesilovač Mini-Circuits ZX60-V63+ [12].	45
Obrázek 2.44	Atenuátor API Weinschel model 3404 ve formě modulu [13].	47
Obrázek 2.45	Atenuátor Analog Devices ve formě integrovaného obvodu osazený na vývojové desce [7].	48
Obrázek 2.46	Azimutální rotátor v kombinaci s elevačním a polarizačním rotátorem.	49
Obrázek 2.47	Možnosti instalace rotátoru YAESU [14].	50
Obrázek 2.48	Rotátor YAESU G-1000 DXA s manuální ovládací jednotkou vlevo [16] a ARS-USB jednotka vpravo [15].	52
Obrázek 2.49	Blokové schéma ovládací jednotky.	54
Obrázek 2.50	Blokové schéma lineárního napájecího zdroje s barevně označenými bloky týkající se konkrétní napájecí větve.	56
Obrázek 3.1	Grafy průběhu <i>vložného útlumu</i> a <i>izolace</i> v závislosti na kmitočtu přepínače ADRF 5040, měřeno výrobcem a převzato z [17].	59
Obrázek 3.2	Graf průběhu <i>přenosu</i> v závislosti na kmitočtu určujícího <i>vložný útlum</i> pro dvě různé sepnuté cesty přepínače ADRF 5040.	59
Obrázek 3.3	Graf průběhu <i>přenosu</i> v závislosti na kmitočtu určujícího <i>izolaci</i> mezi porty přepínače ADRF 5040.	60
Obrázek 3.4	Zapojený koaxiální přepínač Analog Devices ADRF 5040 na vývojové desce.	60
Obrázek 3.5	Graf průběhu <i>PSV</i> na vstupu (C) a na výstupu (Port 1) v závislosti na kmitočtu přepínače TEleRel TR04 pro sepnutou cestu C <-> Port 1.	61
Obrázek 3.6	Graf průběhu <i>přenosu</i> v závislosti na kmitočtu určujícího <i>vložný útlum</i> pro sepnutou cestu C <-> Port 1 přepínače TEleRel TR04.	62
Obrázek 3.7	Graf průběhu <i>přenosu</i> v závislosti na kmitočtu určujícího <i>izolaci</i> mezi C a Port 1 přepínače TEleRel TR04.	62
Obrázek 3.8	Zapojený koaxiální přepínač TEleRel TR04 s deskou pro připojení ovládání a napájení a držákem na DIN lištu.	63
Obrázek 3.9	Grafy průběhu <i>PSV</i> v závislosti na kmitočtu přepínače Teledyne CCR-38 udávané výrobcem, převzato z [19].	63
Obrázek 3.10	Grafy průběhu <i>PSV</i> na vstupu (C) a na výstupu (J1) v závislosti na kmitočtu přepínače Teledyne CCR-38 pro sepnutou cestu C <-> J1.	64
Obrázek 3.11	Grafy průběhu <i>vložného útlumu</i> v závislosti na kmitočtu přepínače Teledyne CCR-38 udávané výrobcem, převzato z [19].	64

Obrázek 3.12	Grafy průběhu <i>přenosu</i> v závislosti na kmitočtu určujícího <i>vložný útlum</i> pro sepnutou cestu C <-> J1 přepínače Teledyne CCR-38.	64
Obrázek 3.13	Grafy průběhu <i>izolace</i> v závislosti na kmitočtu přepínače Teledyne CCR-38 udávané výrobcem, převzato z [19].....	65
Obrázek 3.14	Graf průběhu <i>přenosu</i> v závislosti na kmitočtu určujícího <i>izolaci</i> mezi C a J1 přepínače Teledyne CCR-38.	65
Obrázek 3.15	Zapojený koaxiální přepínač Teledyne CCR-38 s deskou pro připojení ovládání a napájení a držákem na DIN lištu.	66
Obrázek 3.16	Výsledné motivy filtru dolní propust 1 GHz 7. řádu (nahore) a 11. řádu (dole).	67
Obrázek 3.17	Graf průběhu <i>ztrát odrazu</i> pěnového mikrovlnného absorbéru v závislosti na kmitočtu (průběhy pro 3 výšky absorbéru), převzato z [20]......	68
Obrázek 3.18	Graf průběhu <i>přenosu</i> filtru dolní propust v závislosti na kmitočtu pro postupné úpravy krabičky.....	69
Obrázek 3.19	Graf průběhu <i>přenosu</i> filtru dolní propust 1 GHz 7. řádu v závislosti na kmitočtu (nahore) a 11. řádu (dole).....	70
Obrázek 3.20	Graf průběhu <i>PSV</i> na vstupu a výstupu filtru dolní propust 1 GHz 7. řádu v závislosti na kmitočtu (nahore) a 11. řádu (dole) – simulace v CST. ..	71
Obrázek 3.21	Graf průběhu <i>PSV</i> na vstupu a výstupu filtru dolní propust 1 GHz 7. řádu v závislosti na kmitočtu (nahore) a 11. řádu (dole) – měření.	72
Obrázek 3.22	(a) filtr dolní propust 1 GHz uzavřený v krabičce a použití absorbéru, (b) filtr 7. řádu a (c) filtr 11. řádu.	72
Obrázek 3.23	Výsledný motiv filtru horní propust 1,1 GHz.....	73
Obrázek 3.24	Graf průběhu <i>přenosu</i> filtru horní propust 1,1 GHz v závislosti na kmitočtu.....	74
Obrázek 3.25	Graf průběhu <i>PSV</i> na vstupu a výstupu filtru horní propust 1,1 GHz v závislosti na kmitočtu.....	74
Obrázek 3.26	Filtr horní propust 1,1 GHz v krabičce.....	75
Obrázek 3.27	Schéma realizovaného filtru pásmová zádrž VKV-FM, vytvořeno v nástroji Nuhertz Filter Solutions [9].....	76
Obrázek 3.28	Graf průběhu <i>přenosu</i> filtru pásmová zádrž VKV-FM v závislosti na kmitočtu.....	77
Obrázek 3.29	Graf průběhu <i>PSV</i> na vstupu a výstupu filtru pásmová zádrž VKV-FM v závislosti na kmitočtu.....	77
Obrázek 3.30	Vyrobený filtr pásmová zádrž VKV-FM umístěný v krabičce z hliníkového plechu.	78
Obrázek 3.31	Schéma realizovaného filtru pásmová zádrž LTE 800 a GSM 900, vytvořeno v nástroji Nuhertz Filter Solutions [9].	79
Obrázek 3.32	Jednozávitová cívka, vytvořeno v Coil32 [21].	80

Obrázek 3.33	Vícezávitová cívka s mezerou mezi závitů, vytvořeno v Coil32 [21]. ...	80
Obrázek 3.34	Graf průběhu <i>přenosu</i> filtru pásmová zadrž LTE 800 a GSM 900 v závislosti na kmitočtu.	82
Obrázek 3.35	Graf průběhu <i>PSV</i> na vstupu a výstupu filtru pásmová zadrž LTE 800 a GSM 900 v závislosti na kmitočtu.	82
Obrázek 3.36	Vyrobený filtr pásmová zadrž LTE 800/GSM 900 umístěný v krabici z pocínovaného plechu.	83
Obrázek 3.37	Schéma tranzistorového spínače pro napájení zesilovače.	84
Obrázek 3.38	Graf průběhu <i>zisku</i> zesilovače v závislosti na kmitočtu, měření a křivka udaná výrobcem [22].	85
Obrázek 3.39	Graf průběhu <i>PSV</i> na vstupu a výstupu zesilovače v závislosti na kmitočtu, měření a křivka udaná výrobcem [22].	85
Obrázek 3.40	Graf průběhu <i>šumového čísla</i> v závislosti na kmitočtu, křivka udaná výrobcem [22].	86
Obrázek 3.41	Širokopásmový zesilovač Mini-Circuits ZX60-V63+ v krabici z hliníkového plechu.	86
Obrázek 3.42	Graf průběhu změřeného <i>útlumu</i> v závislosti na kmitočtu.	87
Obrázek 3.43	Graf průběhu změřeného <i>PSV</i> na vstupu a výstupu attenuátoru v závislosti na kmitočtu pro nastavený útlum 0 dB (všechny dílčí útlumové články odepnuty).	88
Obrázek 3.44	Graf průběhu změřeného <i>PSV</i> na vstupu a výstupu attenuátoru v závislosti na kmitočtu pro nastavený útlum 55 dB (všechny dílčí útlumové články připnuty).	88
Obrázek 3.45	Zapojení attenuátor API Weinschel 3406-55.	89
Obrázek 3.46	Horní strana DPS ovládací jednotky s popisem konektorů.	91
Obrázek 3.47	Zapojená ovládací jednotka pro VF jednotku (vpravo) a jednotka s programátorem (vlevo).	91
Obrázek 3.48	Zjednodušené schéma napájecí větve zdroje s lineárním stabilizátorem.	94
Obrázek 3.49	Schéma navrženého transformátoru s parametry jednotlivých vinutí a odboček, poskytnuto výrobcem [25].	96
Obrázek 3.50	Náhradní schéma tepelného odporu systému s přídavným chladičem. ...	98
Obrázek 3.51	Zapojení napájecí zdroj v krabici.	101
Obrázek 3.52	Umístění a popis svorkovnic na DPS uvnitř krabice ovládací jednotky pro připojení rotátoru.	103
Obrázek 3.53	Schéma propojení rotátoru YAESU (se stejnosměrným elektromotorem) s ovládací jednotkou ARS-USB, převzato z [15].	104
Obrázek 3.54	Spektrální analyzátor Signal Hound BB60C spolu s průmyslovým PC.	106

Obrázek 3.55	První verze GUI pro testování ovládání VF jednotky.	107
Obrázek 3.56	Část vysokofrekvenční jednotky umístěná na DIN lištách (vlevo) a držák na DIN lištu (vpravo).	109
Obrázek 3.57	Deska s konektory pro propojení monitorovací stanice.	110
Obrázek 3.58	Monitorovací stanice s popisky jednotlivých dílčích zařízení.	110
Obrázek 3.59	Útlum kabelu v závislosti na kmitočtu pro 1 m délky udávaný výrobcem [29].	111
Obrázek 3.61	Graf průběhu <i>útlumu</i> přímé cesty v závislosti na kmitočtu.	113

SEZNAM TABULEK

Tabulka 2.1	Parametry antén pro I. subpásmo.	8
Tabulka 2.2	Parametry antén pro II. subpásmo.	10
Tabulka 2.3	Parametry antén pro III. subpásmo.	11
Tabulka 2.4	Parametry elektromechanických koaxiálních přepínačů konfigurace SP4T.	13
Tabulka 2.5	Parametry přepínačů SP4T ve formě integrovaného obvodu.	15
Tabulka 2.6	Parametry elektromechanických koaxiálních přepínačů konfigurace SP6T.	16
Tabulka 2.7	Parametry přepínače Peregrine Semiconductor PE42562.	18
Tabulka 2.8	Parametry filtru typu dolní propust 1 GHz.	23
Tabulka 2.9	Hodnoty normovaných vodivostí pro eliptickou aproximaci 7. řádu [8].	23
Tabulka 2.10	Rozměry jednotlivých úseků vedení pro filtry dolní propust 1 GHz a 2,5 GHz 7. řádu.	30
Tabulka 2.11	Rozměry jednotlivých úseků vedení pro filtry dolní propust 1 GHz a 2.5 GHz 11. řádu.	31
Tabulka 2.12	Parametry filtru typu horní propust 1,1 GHz.	33
Tabulka 2.13	Hodnoty normalizovaných charakteristických admitancí pro $n = 6$ [8]. ..	34
Tabulka 2.14	Hodnoty normalizovaných charakteristických admitancí a charakteristických impedancí jednotlivých úseků.	35
Tabulka 2.15	Rozměry jednotlivých úseků vedení pro filtr horní propust 1,1 GHz.	36
Tabulka 2.16	Parametry filtru typu pásmová zádrž pro FM pásmo.	37
Tabulka 2.17	Parametry filtru typu pásmová zádrž pro LTE 800 a GSM 900.	40
Tabulka 2.18	Parametry zesilovačů ve formě modulu.	44
Tabulka 2.19	Parametry vybraných atenuátorů ve formě modulu.	46
Tabulka 2.20	Parametry vybraných atenuátorů ve formě integrovaného obvodu.	47
Tabulka 2.21	Parametry rotátorů YAESU.	50
Tabulka 2.22	Parametry jednotky EA4TX ARS-USB.	52
Tabulka 2.23	Parametry mikrokontroléru ATmega 165PA a převodníku FT232RL. ..	53
Tabulka 2.24	Parametry jednotlivých napájecích větví.	57
Tabulka 3.1	Parametry přepínače TEleRel TR04 v kmitočtovém rozsahu 0 – 6 GHz udávané výrobcem [18].	61
Tabulka 3.2	Srovnání naměřených parametrů s parametry uvedenými výrobcem.	66

Tabulka 3.3	Výrobní parametry jednozávitových cívek, výsledek návrhu v Coil32 [21].	80
Tabulka 3.4	Výrobní parametry vícezávitových cívek, výsledek návrhu v Coil32 [21].	80
Tabulka 3.5	Parametry atenuátoru API Weinschel 3406-55 v kmitočtovém rozsahu 0 – 3 GHz a 3 – 6 GHz udávané výrobcem [23].	87
Tabulka 3.6	Základní nastavení komunikace ovládací jednotka – PC.	92
Tabulka 3.7	Požadované parametry jednotlivých napájecích větví podle použitých zařízení.	93
Tabulka 3.8	Parametry transformátoru vyrobeného na zakázku.	96
Tabulka 3.9	Hodnoty tepelné vodivosti a korekčního faktoru [26].	101
Tabulka 3.10	Použitá kabeláž a její parametry.	102
Tabulka 3.11	Popis jednotlivých kontaktů svorkovnic ovládací jednotky.	103
Tabulka 3.12	Parametry průmyslového PC	106
Tabulka E.1	Seznam součástek – zdroj 5 V, 12 V, 24 V a 28 V.	154
Tabulka E.2	Seznam součástek – zdroj $\pm 3,3$ V.	155
Tabulka E.3	Seznam součástek – zdroj 5 V.	156
Tabulka E.4	Seznam součástek – svorkovnice.	156
Tabulka E.5	Seznam součástek – ovládací jednotka.	157
Tabulka E.6	Seznam součástek – zesilovač.	158
Tabulka E.7	Seznam součástek – konektorová deska pro koaxiální přepínač Teledyne.	158
Tabulka E.8	Seznam součástek – konektorová deska pro koaxiální přepínač TEleRel.	158
Tabulka E.9	Seznam součástek – dolní propust 1 GHz.	159
Tabulka E.10	Seznam součástek – horní propust 1,1 GHz.	159
Tabulka E.11	Seznam součástek – pásmová zádrž VKV-FM.	159
Tabulka E.12	Seznam součástek – pásmová zádrž LTE 800 a GSM 900.	159
Tabulka E.13	Seznam součástek – ostatní	160
Tabulka E.14	Seznam měřicích přístrojů a pomůcek	161

ÚVOD

Rádiové spektrum je omezený přírodní zdroj, a proto je nezbytné, aby bylo využíváno co možná nejvíce účinným způsobem všemi uživateli na světě.

Účelem monitorování rádiového spektra je získání podkladů k jeho efektivní správě, díky které je možné zajištění jeho optimálního využití rádiovými stanicemi v definovaných podmínkách, bez působení škodlivého rušení.

Cílem této práce bylo navrhnout vysokofrekvenční jednotku přenosné monitorovací stanice. Návrh celé monitorovací stanice včetně vysokofrekvenční jednotky je pojat jako modulární zařízení, což umožňuje její široké využití.

Vysokofrekvenční jednotka je schopna přijímat signál v širokém kmitočtovém pásmu s různou polarizací a ze všech směrů. U takto přijatého signálu je pak možno upravit jeho úroveň nebo ze širokého kmitočtového pásma vybrat užší subpásmo, a přitom minimálně ovlivnit kvalitu signálu. Takto přijatý a upravený signál je následně vyhodnocován uživatelem jednotky v monitorovacím softwaru prostřednictvím počítače.

První kapitola práce popisuje správu a monitoring kmitočtového spektra, metody a techniky používané Českým telekomunikačním úřadem, který má tuto oblast na starost. Další kapitola se věnuje samotnému návrhu a výběru dílčích zařízení vysokofrekvenční jednotky. U jednotlivých zařízení je předložen vlastní návrh nebo je zařízení vybráno jako komerčně dostupné podle požadovaných parametrů. Třetí kapitola se zabývá realizací, výběrem konkrétních dílčích zařízení a u některých i jejich modifikací. Dále jsou zde uvedeny výsledky měření vybraných parametrů a ve stručnosti popsány další části monitorovací stanice jako je PC s monitorovacím softwarem, spektrální analyzátor a konstrukční řešení skříně pro monitorovací stanici.

V závěru je pak navržena a realizovaná vysokofrekvenční jednotka zhodnocena a je popsán další postup práce na dokončení celé monitorovací stanice.

1 MONITOROVÁNÍ SPEKTRA

Rádiové spektrum jsou elektromagnetické vlny o kmitočtu přibližně od 6 kHz do 3000 GHz šířené prostorem bez zvláštního vedení.

Využívání rádiového spektra se na mezinárodní úrovni řídí radiokomunikačním řádem Mezinárodní telekomunikační unie ITU [1]. Vzhledem k těmto mezinárodním předpisům si každá členská země vytváří vlastní legislativu, příslušná pravidla a předpisy tak, aby vyhověly své národní radiokomunikační infrastruktuře a cílům. Radiokomunikační řád ITU je v České republice aplikován plánem přidělení kmitočtových pásem (národní kmitočtová tabulka [2]), který určuje přidělení kmitočtových pásem jednotlivým radiokomunikačním službám. V České republice zajišťuje správu a monitorování rádiového spektra Český telekomunikační úřad. Na plán přidělení navazuje plán využití rádiového spektra, ve kterém Český telekomunikační úřad stanoví technické parametry a podmínky využití rádiového spektra radiokomunikačními službami.

Monitorování rádiového spektra je jedním ze základních prostředků jeho správy. Správa spektra je soubor činností zahrnujících politiku, regulaci a administraci včetně plánování a koordinace společného využití spektra, jehož cílem je zajištění optimálního využití rádiovými stanicemi v definovaných podmínkách, bez působení škodlivého rušení.

Účely monitorování spektra jsou:

- Podílet se na řešení rušení rádiového spektra, jehož výsledkem je to, aby rádiové služby mohly koexistovat společně.
- Snižování nákladů spojených s provozem a instalací rádiových služeb.
- Napomáhat v zajišťování požadované kvality rádiových služeb pro širokou veřejnost.
- Poskytování naměřených údajů za účelem správy kmitočtového spektra, jako jsou aktuální obsazení kmitočtu a pásem.
- Ověřování technických a provozních (dodržení licencování) parametrů vysílaných signálů.
- Zjišťování a následná identifikace nelegálního vysílání nebo zjišťování potenciálních zdrojů rušení.

Doporučení, podle kterých se provádí správa a monitorování rádiového spektra, vydává ITU. Doporučení jsou označena jako SM a pak následuje číslo specifikující doporučení. Například pro mobilní monitorovací stanice je vydáno doporučení SM. 1723.

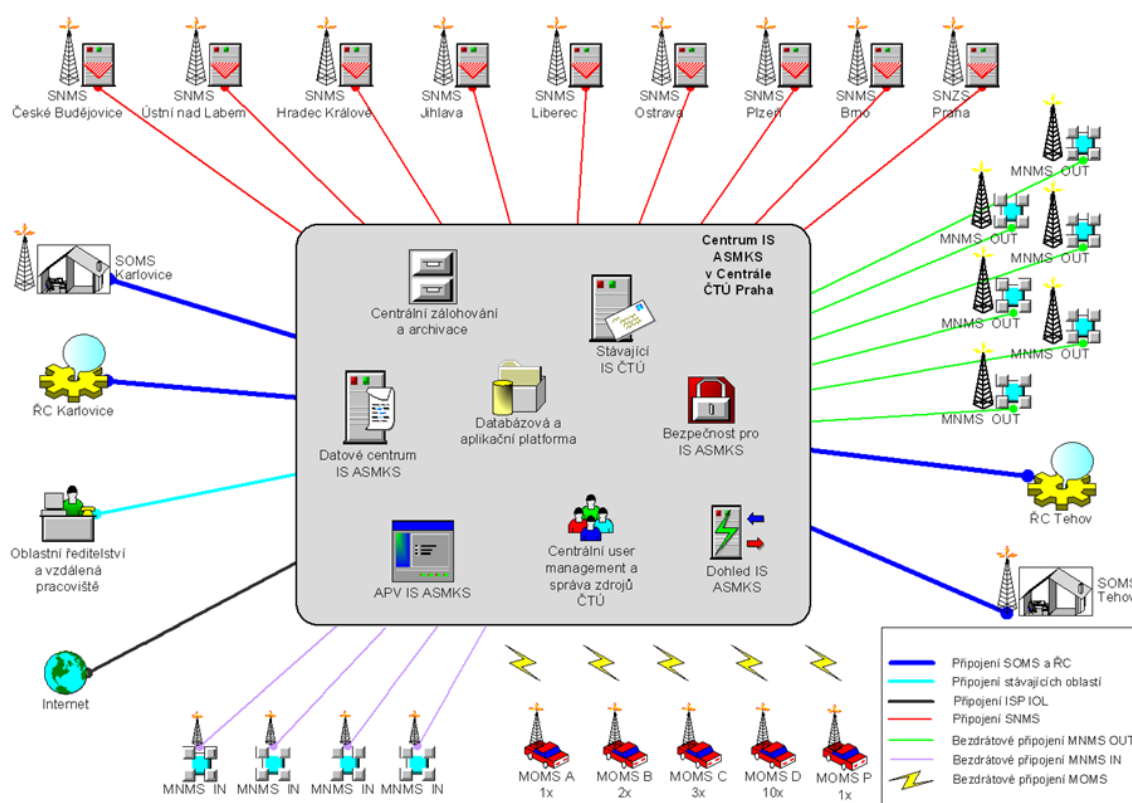
V další kapitole budou popsány principy a techniky monitoringu rádiového spektra používané Českým telekomunikačním úřadem.

1.1 Monitorování spektra Českým telekomunikačním úřadem

Kontrolu rádiového spektra a kvality radiokomunikačních služeb v rámci Českého telekomunikačního úřadu (dále jen ČTÚ) provádí odbor kontroly a ochrany spotřebitele a oblastní odbory pro jednotlivé kraje.

Pro monitoring rádiového spektra ČTÚ používá automatizovaný systém monitorování kmitočtového spektra – ASMKS. Ten se skládá ze sítě monitorovacích stanic, monitorovacího a vyhodnocovacího softwaru a softwaru pro správu systému.

Struktura ASMKS je vidět na obrázku 1.1 a skládá se ze dvou stacionárních obsluhovaných monitorovacích stanic (SOMS), devíti stacionárních neobsluhovaných monitorovacích stanic (SNMS), šesti mobilních neobsluhovaných monitorovacích stanic pro venkovní užití (MNMS OUT), čtyř mobilních neobsluhovaných monitorovacích stanic pro vnitřní užití (MNMS IN) a sedmnácti měřících vozů neboli mobilních obsluhovaných monitorovacích stanic (MOMS).



Obrázek 1.1 Architektura automatizovaného systému monitorování kmitočtového spektra (ASMKS) [3].

Kontrolu rádiového spektra ČTÚ provádí formou monitorování pro účely kmitočtového plánování, dodržování podmínek oprávnění k využívání kmitočtů, vyhledávání nepovolených stanic a neznámých signálů nebo identifikací zdrojů rušení (zjištění parametrů signálů).

2 SYSTÉMOVÝ NÁVRH ZAŘÍZENÍ

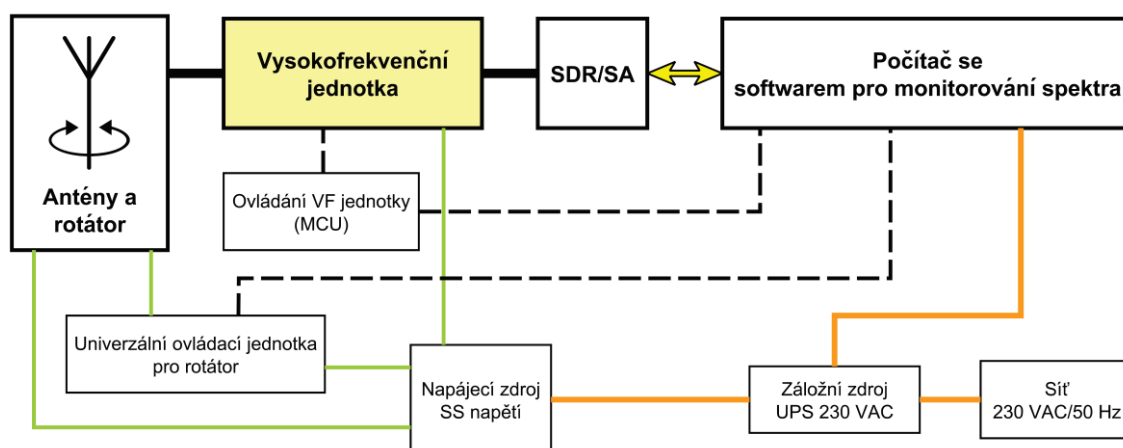
Pro účely monitorování spektra uvedené v předchozí kapitole bylo třeba navrhnout a realizovat přenosnou monitorovací stanici, která svým principem vychází ze stanic používaných v ASMKS, ale je přizpůsobena konkrétním požadavkům ČTÚ. Tyto požadavky se odvíjí od nejvíce používaných služeb v dnešní době a berou ohled i na vývoj v blízké budoucnosti.

Přenosná monitorovací stanice se skládá z několika částí, které jsou uvedeny na obrázku 2.1 ve formě blokového schématu.

Celá stanice bude napájena ze sítě 230 V/50 Hz a pro případ výpadku energie bude vybavena záložním zdrojem. V blokovém schématu je oranžovou čarou naznačeno, která dílčí zařízení budou napájena přímo ze sítě. Jako další zdroj napájení bude použit lineární zdroj stejnosměrného napětí, který poskytuje více napájecích napětí. Zelenou čarou je v blokovém schématu naznačeno, která dílčí zařízení jsou napájena stejnosměrným napětím z tohoto zdroje.

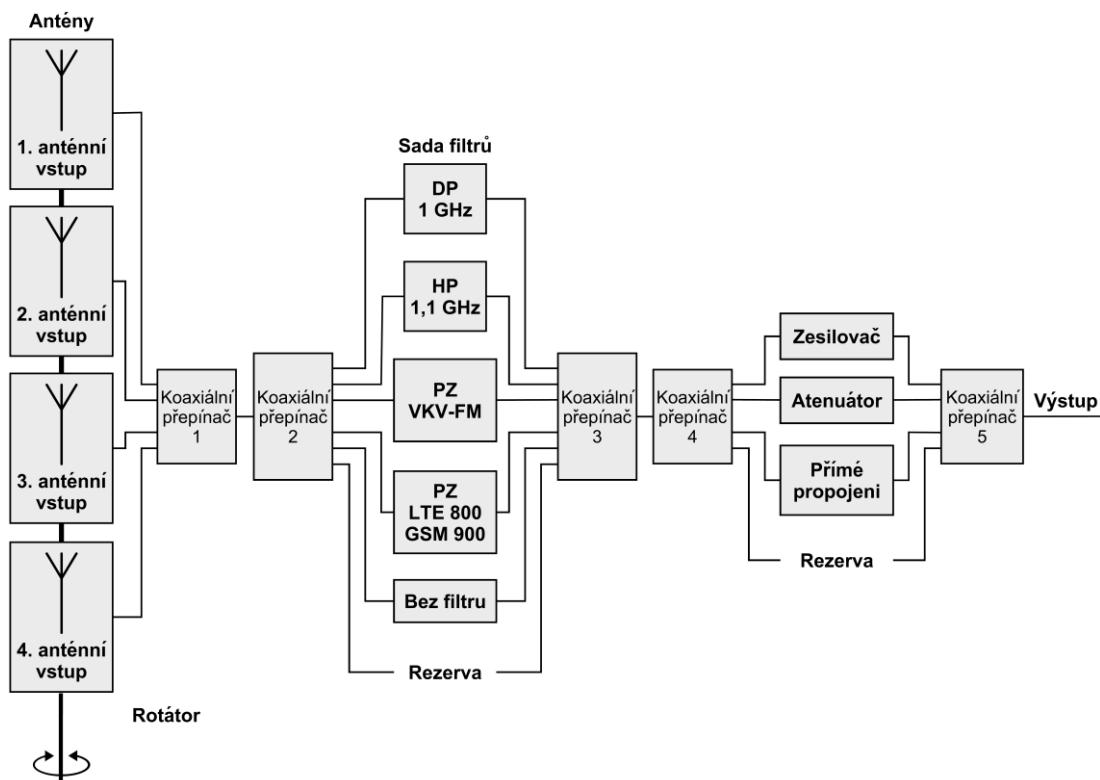
V dalších kapitolách bude podrobně popsán návrh vysokofrekvenční jednotky spolu s jejím ovládáním a napájením. Dále bude popsán výběr vhodného rotátoru a bude zde uvedeno několik antén, které lze použít pro pásmo 9 kHz až 6 GHz.

Část zajišťující zpracování přijatého signálu obsahuje přijímač, kterým může být softwarově definované rádio (SDR) nebo spektrální analyzátor (SA) a počítač s monitorovacím softwarem. Jako přijímač bude použit real-time spektrální analyzátor Signal Hound BB60C. V kapitole 3.8 Měření, zpracování a zobrazení naměřených dat jsou ve stručnosti uvedeny parametry SA a počítače. Tyto parametry bude třeba brát v úvahu při návrhu vysokofrekvenční jednotky.



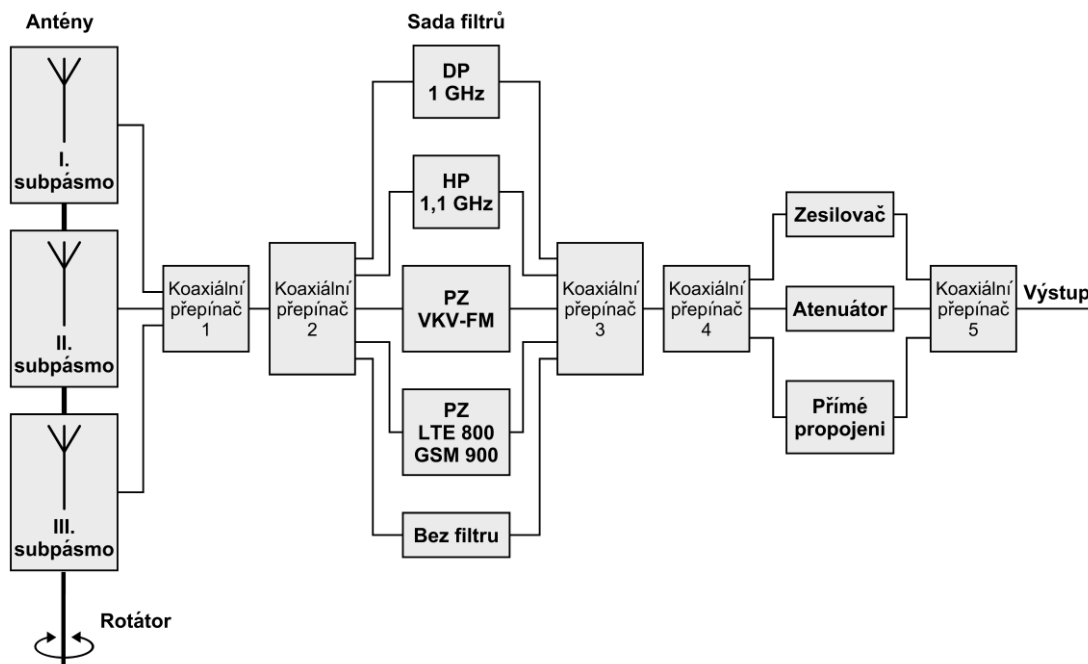
Obrázek 2.1 Blokové schéma přenosné stanice pro monitorování spektra.

Návrh vysokofrekvenční jednotky přenosné monitorovací stanice je vidět na obrázku 2.2 ve formě blokového schématu. Pro stanici se uvažuje dvojí možnost využití lišící se pouze v příjmu konkrétního kmitočtu nebo pásma, a tudíž ve volbě antén a možnosti užití rotátoru.



Obrázek 2.2 Blokové schéma vysokofrekvenční jednotky monitorovací stanice.

První možností využití je dlouhodobé monitorování spektra, kdy bude stanice po určitou dobu umístěna na jednom místě. Pro toto využití bude potřeba pokrýt celé pásmo 9 kHz až 6 GHz vhodnými anténami. Antény budou umístěny na rotátoru a tento celek pak na stožáru (přenosném). Součástí může být i druhý rotátor pro výběr polarizace (horizontální/vertikální), nebo se poloha antény pro zvolenou polarizaci může nastavit ručně na celou dobu měření. Zapojení vysokofrekvenční jednotky monitorovací stanice pro tuto možnost využití je vidět na obrázku 2.3 ve formě blokového schématu.



Obrázek 2.3 Blokové schéma vysokofrekvenční jednotky monitorovací stanice, varianta pro dlouhodobé monitorování spektra.

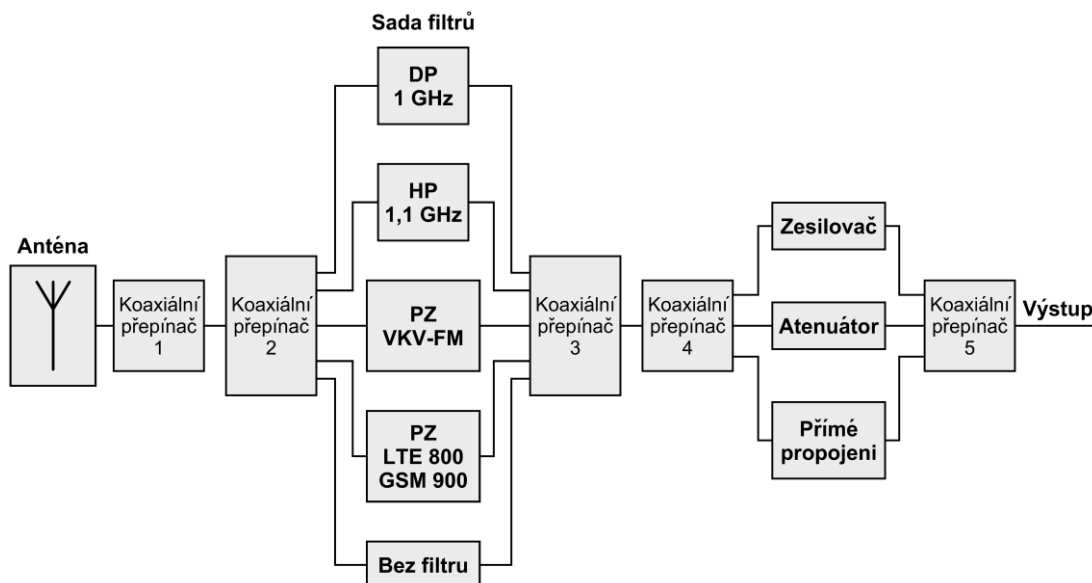
V první části blokového schématu je znázorněno použití tří antén, které dohromady pokrývají celé kmitočtové pásmo 9 kHz až 6 GHz. Pro výběr konkrétního subpásma (antény) slouží koaxiální přepínač č. 1. Vybraný signál ze zvolené antény je dále přiveden na koaxiální přepínač č. 2.

Ve druhé části blokového schématu se nachází sada filtrů: dolní propust s mezním kmitočtem 1 GHz, horní propust s mezním kmitočtem 1,1 GHz, pásmová zadrž pro pásmo VKV-FM (87,5 MHz – 108 MHz), pásmová zadrž pro pásmo LTE 800/GSM 900 (791 MHz – 862 MHz, 876 MHz – 960 MHz) a nakonec i možnost propojení bez filtru. Konkrétní filtr se vybírá pomocí koaxiálních přepínačů č. 2 a 3, které jsou ovládány současně. Signál z vybraného filtru nebo přímo z antény je přiveden na koaxiální přepínač č. 4.

Poslední částí je možnost použití zesilovače, atenuátoru (útlumového článku) nebo přímé cesty. K tomuto výběru slouží koaxiální přepínače č. 4 a 5, které jsou ovládány současně.

Za koaxiálním přepínačem č. 5 už následuje výstup vysokofrekvenční jednotky připojený na vstup spektrálního analyzátoru.

Druhou možností využití je krátkodobé monitorování na určitém místě. Toto místo bylo určeno na základě stížnosti na rušení konkrétní služby. V této konfiguraci už nebude třeba pokrýt celé pásmo 9 kHz až 6 GHz, ale úzké subpásmo, které bylo specifikováno podle typu služby, která je rušena, proto bude vždy použita jen jedna anténa, a to většinou podle místních možností bez rotátoru. První koaxiální přepínač bude proto po celou dobu přepnut na výstup této antény. Zapojení vysokofrekvenční jednotky monitorovací stanice pro tuto možnost je vidět na obrázku 2.4 ve formě blokového schématu.



Obrázek 2.4 Blokové schéma vysokofrekvenční jednotky monitorovací stanice, varianta pro krátkodobé monitorování předem blíže určeného pásma.

Celá vysokofrekvenční jednotka je sestavena z dílčích zařízení, která jsou ve formě jednotlivých bloků pospojována do jednoho celku. Některá dílčí zařízení jsou komerčně dostupná a některá realizována podle vlastního návrhu a konstrukce. Při výběru a návrhu zařízení bylo bráno v úvahu to, že stanice má být přenosná a její umístění se uvažuje především ve venkovním prostředí, kde na ni budou působit povětrnostní vlivy.

2.1 Rozdělení do kmitočtových subpásem a výběr antén

Kmitočtový rozsah vysokofrekvenční jednotky je 9 kHz až 6 GHz. Tento rozsah bude rozdělen do 3 subpásem a v každém subpásmu bude uveden přehled vhodných antén.

Protože se jedná o přenosnou monitorovací stanici, tak musí být brána v úvahu hmotnost, rozměry antén a také to, že antény budou umístěny ve venkovním prostředí.

2.1.1 I. subpásmo

Rozsah I. subpásmu je od 9 kHz až do stovek MHz podle konkrétního typu antény. Délka vlny v tomto subpásmu se pohybuje v řádu kilometrů až metrů. Typickými anténami používanými v tomto pásmu jsou aktivní antény, například smyčková anténa, prutová anténa nebo dipólová anténa. V tomto subpásmu se uvažuje příjem pouze vertikálně polarizované vlny pomocí všesměrové antény, protože většina služeb používá vertikální polarizaci. Těmto požadavkům odpovídají prutové antény, typické provedení prutové antény určené pro monitorování spektra je vidět na obrázku 2.5.

První vybranou anténou je aktivní prutová anténa **Rohde & Schwarz HE010E** vhodná pro monitorování spektra. Její podrobné technické parametry ve srovnání s dalšími anténami pro toto subpásmo jsou uvedeny v tabulce 2.1. Kmitočtový rozsah antény je 8,3 kHz až 100 MHz.

Druhou vhodnou anténou pro toto pásmo je aktivní prutová anténa **Alaris Antennas OMNI-A0112**. Anténa je určena pro monitorování spektra v rozsahu 9 kHz až 300 MHz, je vhodná pro mobilní a přenosné monitorovací stanice a vyžaduje zemní desku minimálně 140 x 600 mm (střecha automobilu, uměle vytvořená zemní deska). Podrobné technické parametry jsou uvedeny v tabulce 2.1.

Třetí vybranou anténou je aktivní prutová anténa **TCI Model 7031**. Anténa je určena pro monitorování spektra v rozsahu 9 kHz až 30 MHz. Podrobné technické parametry jsou uvedeny v tabulce 2.1.



Obrázek 2.5 Aktivní prutová anténa Rohde & Schwarz HE010E [4].

Tabulka 2.1 Parametry antén pro I. subpásmo.

	R & S HE010E		Alaris Antennas OMNI-A0112	TCI Model 7031
Kmitočtový rozsah	8,3 kHz – 100 MHz		9 kHz – 300 MHz	9 kHz – 30 MHz
Polarizace	vertikální		vertikální	vertikální a horizontální
PSV	8,3 kHz – 20 kHz	<4,5	<2,5	2
	20 kHz – 100 MHz	<2		
AF	11 dB/m		-	-
Rozměry	120 × 1000 mm (průměr × délka)		140 × 600 mm (průměr × délka)	144 × 1250 mm (průměr × délka)
Hmotnost	1 kg		<2 kg	2,7 kg
Aktivní část	Napájecí napětí 24 VDC, 190 mA		Zisk zesilovače 22 dB @ 300 MHz, napájecí napětí 12 – 24 VDC	Napájecí napětí 18 – 24 VDC (12 VDC)

2.1.2 II. subpásmo

Rozsah II. subpásmo je v řádu stovek MHz, kdy konkrétní rozsah závisí na parametrech zvolené antény. Typickými anténami používanými v tomto pásmu jsou: dipól, bikónická anténa, diskónový monopól nebo logaritmicko-periodická anténa. V tomto pásmu se bere v úvahu vertikální i horizontální polarizace. Změna polarizace bude docílena vhodnou polohou antény.

První z vybraných antén je pasivní dipól **Rohde & Schwarz HK309**, jehož kmitočtový rozsah je od 20 MHz až do 1300 MHz. Anténa je vidět na obrázku 2.6 a podrobné technické parametry jsou uvedeny v tabulce 2.2.



Obrázek 2.6 Pasivní dipól Rohde & Schwarz HK309 [4].

Druhou z vhodných antén pro toto pásmo je diskónová anténa **Antenna Experts AWD-100-2000**. Tato anténa vychází z klasického monopólu, který je upraven pro dosažení větší šířky pásma. Kmitočtový rozsah této antény je 100 MHz až 2000 MHz. Podrobné technické parametry jsou uvedeny v tabulce 2.2. Typické provedení diskónové antény je vidět na obrázku 2.7.



Obrázek 2.7 Diskónová anténa (obrázek je pouze ilustrační) [5].

Třetí vybranou je logaritmicko-periodická anténa **Rohde & Schwarz HL223**, která pokrývá pásmo 200 MHz až 1300 MHz. Polarizace je lineární a podle umístění lze přijímat horizontálně nebo vertikálně polarizovanou vlnu. Podrobné technické parametry jsou uvedeny v tabulce 2.2.

Poslední vhodnou anténou pro toto subpásmo je logaritmicko-periodická anténa **Trival Antene AD-22/C**. Kmitočtový rozsah této antény je 80 MHz až 1300 MHz. Nevýhodou této antény jsou větší rozměry a hmotnost. Podrobné technické parametry jsou uvedeny v tabulce 2.2. Typické provedení logaritmicko-periodické antény je vidět na obrázku 2.8.



Obrázek 2.8 Logaritmicko-periodická anténa Rohde & Schwarz HL223 [4].

Tabulka 2.2 Parametry antén pro II. subpásmo.

	R & S HK309	Antenna Experts AWD-100-2000	R&S HL223
Kmitočtový rozsah	20 MHz – 1300 MHz	100 MHz – 2000 MHz	200 MHz – 1300 MHz
Polarizace	vertikální	vertikální	lineární (vertikální/ horizontální)
PSV	<3,0	<2	<2,0
AF	-	-	-
Zisk	-24 dBi až -2 dBi	2,15 dBi	>6 dBi
Rozměry	100 × 1710 mm (průměr × délka)	900 mm (délka)	765 × 120 × 710 mm (šířka × výška × délka)
Hmotnost	4 kg	4 kg	2 kg
Trival Antene AD-22/C			
Kmitočtový rozsah	80 MHz – 1300 MHz		
Polarizace	lineární (vertikální/horizontální)		
PSV	<2,5		
AF	-		
Zisk	>6 dBi		
Rozměry	2000 × 1800 mm (šířka × délka)		
Hmotnost	5 kg (montováno s protizávažím 13 kg)		

2.1.3 III. subpásmo

Rozsah III. subpásma je od řádu stovek MHz až do 6 GHz. Vhodnou anténou pro pokrytí tohoto pásma je širokopásmová logaritmicko-periodická anténa. V tomto pásmu se uvažuje jak horizontální, tak vertikální polarizace. Změna polarizace bude docílena vhodnou polohou antény.

První vybranou anténou je širokopásmová logaritmicko-periodická anténa **Rohde & Schwarz HL040E**. Její pracovní pásmo je od 400 MHz až do 6000 MHz. Podrobné technické parametry jsou uvedeny v tabulce 2.3.

Druhou vybranou anténou pro toto subpásmo je širokopásmová logaritmicko-periodická anténa **AARONIA HyperLOG 4060**. Její pracovní pásmo je od 400 MHz až do 6000 MHz. Podrobné technické parametry jsou uvedeny v tabulce 2.3.

Typické provedení širokopásmové logaritmicko-periodické antény je vidět na obrázku 2.9.



Obrázek 2.9 Logaritmicko-periodická anténa Rohde & Schwarz HL040E [4].

Tabulka 2.3 Parametry antén pro III. subpásmo.

	R & S HL040E	AARONIA HyperLOG 4060
Kmitočtový rozsah	400 MHz – 6000 MHz	400 MHz – 6000 MHz
Polarizace	lineární (vertikální/horizontální)	lineární (vertikální/horizontální)
PSV	<2,0	<2,0
AF	-	20 až 40 dB/m
Zisk	5,5 dBi	5 dBi
Rozměry	430 mm × 130 mm × 550 mm (šířka × výška × délka)	360 mm × 30 mm × 590 mm (šířka × výška × délka)
Hmotnost	2,5 kg	1 kg

2.2 Koaxiální přepínače

Koaxiální přepínač slouží k přepínání VF signálu (signálů). Při volbě přepínače je třeba brát v úvahu počet zdrojů signálu, ze kterých chceme provádět výběr anebo počet výstupů, na které chceme signál přepínat a podle toho vybrat vhodnou konfiguraci přepínače. Zde je výčet základních konfigurací koaxiálních přepínačů:

SPST (Single pole, single throw) – jeden vstupní port, jeden výstupní port. Slouží pouze k připojení a odpojení vstupního signálu na výstup.

SPDT (Single pole, double throw) – jeden společný (COM) vstupní port, dva výstupní porty.

SPnT (Single pole, n throw) – jeden společný (COM) vstupní port, n výstupních portů (3, 4, 5, 6, 7, 8, ...). Slouží pro výběr jednoho z n zdrojů signálu nebo pro přepnutí zdroje signálu na jeden z n výstupních portů.

Podle toho, jak je zakončen výstup, na který právě není přepnutý vstup, se přepínače dělí na **absorptive (self-terminating)**, kdy je nepoužitý výstup zakončen jeho charakteristickou impedancí (50 Ω nebo 75 Ω). Druhá varianta je typ **reflective**, kdy je nepoužitý výstup zapojen naprázdno (vysoká impedance) a dochází tak k odrazu signálu.

Dále se přepínače dělí na mechanické ovládané elektronicky nebo mechanicky (ručně), solid-state přepínače využívající PIN diody nebo FET tranzistory a přepínače ve formě integrovaného obvodu na bázi MMIC.

Mechanické přepínače disponují vysokou hodnotou izolace mezi porty, nízkým vložným útlumem a mohou spínat vyšší výkony (až desítky wattů). Životnost mechanického přepínače je omezena počtem přepnutí, řádově miliony přepnutí. Přepínače ve formě integrovaného obvodu jsou rychlejší než mechanické, ale mají nižší hodnotu izolace mezi porty, větší vložný útlum a nejsou schopné přepínat tak velký výkon VF signálu jako mechanické přepínače.

V případě mechanických přepínačů ovládaných elektronicky, se výběr konkrétního výstupního portu, na který má být připojen vstup, provádí následovně: Připojením napájecího napětí na pin, který ovládá požadovaný výstup (řízení někdy označované jako analogové). Uzemněním pinu, který ovládá požadovaný výstup. Řízení logickými úrovněmi (TTL, CMOS), nízká úroveň pro odpojení konkrétního výstupního portu, vysoká úroveň pro připojení konkrétního výstupního portu. Řízení logickými úrovněmi může být i v kombinaci s dekodérem.

Spínání jednotlivých výstupů je prováděno cívkou, která ovládá mechanický kontakt. Pro potlačení napěťových zákmitů, vznikajících při spínání bývá paralelně k cívce zapojena dioda. Mechanický přepínač může být také vybaven indikačním kontaktem pro každý výstup, který umožňuje externí sledování stavu přepínače.

Pokud je přepínač označen jako **latching**, tak to znamená, že na vybraný výstup je přepnut vstup impulzem napětí přivedeným na řídicí pin a zůstává přepnut, dokud není na řídicí pin pro jiný výstup přiveden další impuls napětí. Druhou variantou je **failsafe**, kdy po přivedení napětí na řídicí pin konkrétního výstupu je aktivován a po odpojení napětí se přepínač vrací do předdefinované pozice. V případě **normally open (N.O.)** přepínače je touto předdefinovanou pozicí bez řídicího napětí odpojení všech výstupů

od vstupu (**all off**).

Dalšími parametry jsou: napájecí napětí, kmitočtový rozsah, maximální přenášený VF výkon, poměr stojatých vln, charakteristická impedance nebo použité konektory.

Při výběru přepínačů pro vysokofrekvenční jednotku monitorovací stanice byl kladen důraz nejvíce na tyto dva parametry – vložný útlum přepínače, který by měl být co nejmenší a izolaci mezi porty, která by naopak měla být co největší. Přepínačů se v celém zapojení nachází celkem 5, takže při nevhodné volbě může vložný útlum výrazně ovlivnit úroveň signálu na výstupu VF jednotky.

2.2.1 Koaxiální přepínač 1

První koaxiální přepínač slouží k výběru signálu z jedné z antén. Konfigurace přepínače je zvolena SP4T, kdy je možno připojit až 4 antény. V tomto případě postačuje typ reflective, ale může být i absorptive. V úvahu byly brány pouze přepínače s charakteristickou impedancí 50 Ω , osazené SMA konektory a možností TTL ovládání.

Elektromechanická varianta:

V tabulce 2.4 jsou srovnány parametry elektromechanických přepínačů od několika výrobců v konfiguraci SP4T, reflective/absorptive, failsafe (normally open), 50 Ω . Velikost těchto přepínačů je zhruba 60 × 60 × 90 mm (šířka × výška × délka) a hmotnost do 0,3 kg. Na obrázku 2.10 je vidět typické provedení elektromechanického přepínače.

Tabulka 2.4 Parametry elektromechanických koaxiálních přepínačů konfigurace SP4T.

	TEleRel TR04	JFW 50S	
		1650 absorptive	1315 reflective
Kmitočtový rozsah	DC – 18 GHz	DC – 18 GHz	
Vložný útlum	0,3 dB @ DC – 6 GHz (max.)	0,2 dB @ DC – 4 GHz (max.) 0,3 dB @ 4 – 8 GHz (max.)	
Izolace mezi porty	70 dB @ DC – 6 GHz (min.)	80 dB @ DC – 4 GHz (min.) 70 dB @ 4 – 8 GHz (min.)	70 dB @ DC – 4 GHz (min.) 65 dB @ 4 – 8 GHz (min.)
PSV	1,3 @ DC – 6 GHz (max.)	1,2 @ DC – 4 GHz (max.) 1,3 @ 4 – 8 GHz (max.)	
Napájení	12 V (290 mA), 18 V (180 mA), 24 V (150 mA), 28 V (130 mA)	12 V (350 mA), 15 V (300 mA), 24 V (200 mA), 28 V (160 mA)	12 V (325 mA), 15 V (270 mA), 24 V (200 mA), 28 V (160 mA)
Způsob připojení řídicího signálu	D-SUB, pájecí piny	Pájecí piny	
Ovládání	TTL, TTL + dekodér, BCD dekodér, analogové	TTL, analogové	

Ostatní	Varianta s přepětovou ochranou, absorptive/reflective, větší teplotní rozsah, větší počet cyklů, indikační kontakty, nízké PIM, utěsnění proti vlhku a prachu	-
----------------	---	---

Tabulka 2.4 Parametry elektromechanických koaxiálních přepínačů konfigurace SP4T.

	Teledyne		NARDA-MITEQ SEM143	
	CCT-38Sx40-x absorptive	CCR-38Sx40-x reflective	absorptive	reflective
Kmitočtový rozsah	DC – 18 GHz		DC – 18 GHz	
Vložný útlum	0,1 dB @ DC – 4 GHz (typ.) 0,2 dB @ 4 – 8 GHz (typ.)		0,2 dB @ DC – 3 GHz (max.) 0,3 dB @ 3 – 8 GHz (max.)	
Izolace mezi porty	80 dB @ DC – 8 GHz (typ.)		80 dB @ DC – 3 GHz (min.) 70 dB @ 3 – 8 GHz (min.)	
PSV	1,05 @ DC – 4 GHz (typ.) 1,1 @ 4 – 8 GHz (typ.)		1,2 @ DC – 3 GHz (max.) 1,3 dB @ 3 – 8 GHz (max.)	
Napájení	12 V (420 mA), 15 V (350 mA), 24 V (250 mA), 28 V (200 mA)	12 V (400 mA), 15 V (205 mA), 24 V (170 mA), 28 V (140 mA)	28 V (140 mA)	
Způsob připojení řídícího signálu	D-SUB, pájecí piny	D-SUB, D-Micro, pájecí piny	Pájecí piny	
Ovládání	TTL, TTL + dekodér, analogové		TTL, analogové	
Ostatní	Varianta s ochrannými diodami a indikačními kontakty			
	Radiall			
	R 5744xx4xx absorptive	R 5734xx4xx reflective	R 59130x4xx reflective	
Kmitočtový rozsah	DC – 18 GHz		DC – 6 GHz	
Vložný útlum	0,2 dB @ DC – 3 GHz (max.) 0,3 dB @ 3 – 8 GHz (max.)		0,2 dB @ DC – 3 GHz (max.) 0,3 dB @ 3 – 6 GHz (max.)	
Izolace mezi porty	80 dB @ DC – 3 GHz (min.) 70 dB @ 3 – 8 GHz (min.)		80 dB @ DC – 3 GHz (min.) 70 dB @ 3 – 6 GHz (min.)	
PSV	1,2 @ DC – 3 GHz (max.) 1,3 @ 3 – 8 GHz (max.)		1,2 @ DC – 3 GHz (max.) 1,3 @ 3 – 6 GHz (max.)	
Napájení	12 V (250 mA), 28 V (102 mA)		12 V (250 mA), 28 V (110 mA)	
Způsob připojení řídícího signálu	D-SUB, pájecí piny		Micro-D, pájecí piny	
Ovládání	TTL, TTL + dekodér, analogové		TTL, analogové	
Ostatní	Varianta s ochrannými diodami a indikačními kontakty			



Obrázek 2.10 Elektromechanický koaxiální přepínač TEleRel SP6T [6].

Koaxiální přepínač ve formě integrovaného obvodu:

Analog Devices ADRF5040, který je typu SP4T – absorptive s kmitočtovým rozsahem 9 kHz až 12 GHz, další údaje jsou vidět v tabulce 2.5. Přepínač je určen pro povrchovou montáž v pouzdře LFCSP (4×4 mm, 24 pinů) a lze ho osadit do vlastního zařízení nebo na vývojovou desku **ADRF5040-EVALZ** poskytovanou výrobcem.

Peregrine Semiconductor PE42540, který je typu SP4T – absorptive s kmitočtovým rozsahem 0,01 kHz až 8 GHz, podrobné údaje jsou vidět v tabulce 2.5. Přepínač je určen pro povrchovou montáž v pouzdře LGA (5×5 mm, 32 pinů) a lze ho osadit do vlastního zařízení nebo na vývojovou desku poskytovanou výrobcem. Výhodou tohoto přepínače je integrovaný generátor záporného napájecího napětí.

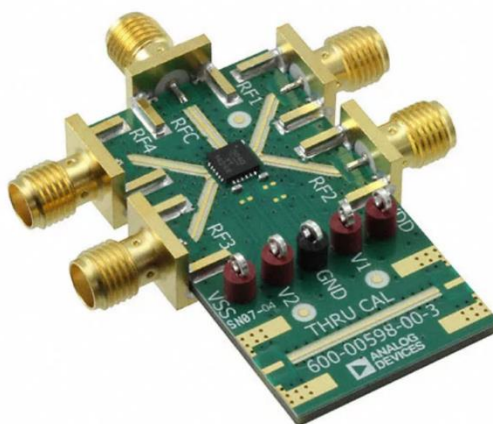
Vývojové desky jsou opatřeny SMA konektory pro připojení VF signálů a konektory pro napájení a ovládání, viz obrázek 2.11.

Tabulka 2.5 Parametry přepínačů SP4T ve formě integrovaného obvodu.

	Analog Devices ADRF5040	Peregrine Semiconductor PE42540
Kmitočtový rozsah	9 kHz – 12 GHz	0,01 kHz – 8 GHz
Vložný útlum	0,8 dB @ 9 kHz – 8 GHz (typ.)	1,0 dB @ 10 Hz – 9 kHz (max.) 1,1 dB @ 3 GHz (max.) 1,3 dB @ 6 GHz (max.)
Izolace mezi porty	34 dB @ 9 kHz – 8 GHz (typ., nejhorší případ)	70 ¹⁾ /74 ²⁾ dB @ 10 Hz – 9 kHz (min.) 40/40 dB @ 3 GHz (min.) 34/28 dB @ 6 GHz (min.)
Napájení	$V_{DD} = 3,0$ až $3,6$ V (20 μ A) $V_{SS} = -3,6$ až $-3,0$ V (20 μ A)	Normal mode – použití interního zdroje záporného napájecího napětí, $V_{SS_EXT} = 0$ V $V_{DD} = 3,0$ až $3,55$ V (90 μ A) Bypass mode ³⁾ – připojení externího zdroje záporného napájecího napětí V_{SS_EXT} . $V_{DD} = 3,0$ až $3,55$ V (50 μ A) $V_{SS_EXT} = -3,6$ až $-3,0$ V (-40 μ A)

Způsob připojení řídícího signálu	Pájecí piny (na vývojové desce)	Konektorová lišta 2,54 mm
Ovládání	Pomocí dvou řídících vstupů a kombinací nízké a vysoké úrovně	

- ¹⁾ Izolace mezi dvěma výstupními porty.
- ²⁾ Izolace mezi vstupním portem a výstupním portem.
- ³⁾ Použití bypass mode zlepšuje potlačení nežádoucích signálů.



Obrázek 2.11 Přepínač ve formě integrovaného obvodu Analog Devices ADRF5040 umístěný na vývojové desce [7].

2.2.2 Koaxiální přepínač 2 a 3

Druhý koaxiální přepínač spolu s třetím zajišťují výběr jednoho ze čtyř filtrů, nebo propojení bez filtru. Konfigurace přepínačů je zvolena SP6T, kdy 6. vstup je brán jako rezervní pro případ, kdy by bylo potřeba zapojit další filtr. Přepínač je opět typu reflective nebo absorptive s charakteristickou impedancí $50\ \Omega$, s SMA konektory a možností TTL ovládání.

Elektromechanická varianta:

V tabulce 2.6 jsou srovnány parametry elektromechanických přepínačů od několika výrobců v konfiguraci SP6T, reflective/absorptive, failsafe (normally open), $50\ \Omega$. Velikost těchto přepínačů je zhruba $60 \times 60 \times 90\text{ mm}$ (šířka \times výška \times délka) a hmotnost do 0,3 kg.

Tabulka 2.6 Parametry elektromechanických koaxiálních přepínačů konfigurace SP6T.

	TEleRel TR06	JFW 50S	
		1638 absorptive	1316 reflective
Kmitočtový rozsah	DC – 18 GHz	DC – 18 GHz	
Vložný útlum	0,3 dB @ DC – 6 GHz (max.)	0,2 dB @ DC – 4 GHz (max.) 0,3 dB @ 4 – 8 GHz (max.)	

Izolace mezi porty	70 dB @ DC – 6 GHz (min.)	80 dB @ DC – 4 GHz (min.) 70 dB @ 4 – 8 GHz (min.)	80 dB @ DC – 4 GHz (min.) 70 dB @ 4 – 8 GHz (min.)
PSV	1,3 @ DC – 6 GHz (max.)	1,2 @ DC – 4 GHz (max.) 1,3 @ 4 – 8 GHz (max.)	
Napájení	12 V (290 mA), 18 V (180 mA), 24 V (150 mA), 28 V (130 mA)	12 V (350 mA), 15 V (300 mA), 24 V (200 mA), 28 V (160 mA)	12 V (350 mA), 15 V (300 mA), 24 V (200 mA), 28 V (160 mA)
Způsob připojení řídícího signálu	D-SUB, pájecí piny	Pájecí piny	
Ovládání	TTL, TTL + dekodér, BCD dekodér, analogové	TTL, analogové	
Ostatní	Varianta s přepětovou ochranou, absorptive/reflective, větší teplotní rozsah, větší počet cyklů, indikační kontakty, nízké PIM, utěsnění proti vlhku a prachu		-

Tabulka 2.6 Parametry elektromechanických koaxiálních přepínačů konfigurace SP6T.

	Teledyne		NARDA-MITEQ SEM163	
	CCT-38Sx60-x absorptive	CCR-38Sx60-x reflective	absorptive	reflective
Kmitočtový rozsah	DC – 18 GHz		DC – 18 GHz	
Vložný útlum	0,1 dB @ DC – 4 GHz (typ.) 0,2 dB @ 4 – 8 GHz (typ.)		0,2 dB @ DC – 3 GHz (max.) 0,3 dB @ 3 – 8 GHz (max.)	
Izolace mezi porty	80 dB @ DC – 8 GHz (typ.)		80 dB @ DC – 3 GHz (min.) 70 dB @ 3 – 8 GHz (min.)	
PSV	1,05 @ DC – 4 GHz (typ.) 1,1 @ 4 – 8 GHz (typ.)		1,2 @ DC – 3 GHz (max.) 1,3 dB @ 3 – 8 GHz (max.)	
Napájení	12 V (420 mA), 15 V (350 mA), 24 V (250 mA), 28 V (200 mA)	12 V (400 mA), 15 V (205 mA), 24 V (170 mA), 28 V (140 mA)	28 V (140 mA)	
Způsob připojení řídícího signálu	D-SUB, pájecí piny	D-Micro, pájecí piny	Pájecí piny	
Ovládání	TTL, TTL + dekodér, analogové		TTL, analogové	
Ostatní	Varianta s ochrannými diodami a indikačními kontakty		Varianta s ochrannými diodami a indikačními kontakty	

Tabulka 2.6 Parametry elektromechanických koaxiálních přepínačů konfigurace SP6T.

	Radiall		
	R 5744xx6xx absorptive	R 5734xx6xx reflective	R 59130x6xx reflective
Kmitočtový rozsah	DC – 18 GHz		DC – 6 GHz
Vložný útlum	0,2 dB @ DC – 3 GHz (max.) 0,3 dB @ 3 – 8 GHz (max.)		0,2 dB @ DC – 3 GHz (max.) 0,3 dB @ 3 – 6 GHz (max.)
Izolace mezi porty	80 dB @ DC – 3 GHz (min.) 70 dB @ 3 – 8 GHz (min.)		80 dB @ DC – 3 GHz (min.) 70 dB @ 3 – 6 GHz (min.)
PSV	1,2 @ DC – 3 GHz (max.) 1,3 @ 3 – 8 GHz (max.)		1,2 @ DC – 3 GHz (max.) 1,3 @ 3 – 6 GHz (max.)
Napájení	12 V (250 mA), 28 V (102 mA)		12 V (250 mA), 28 V (110 mA)
Způsob připojení řídícího signálu	D-SUB, pájecí piny		Micro-D, pájecí piny
Ovládání	TTL, TTL + dekodér, analogové		TTL, analogové
Ostatní	Varianta s ochrannými diodami a indikačními kontakty		Varianta s ochrannými diodami a indikačními kontakty

Koaxiální přepínač ve formě integrovaného obvodu:

Peregrine Semiconductor PE42562, typu SP6T – absorptive s kmitočtovým rozsahem 9 kHz až 8 GHz, další údaje jsou vidět v tabulce 2.7. Přepínač je určen pro povrchovou montáž v pouzdře QFN (4 × 4 mm, 24 pinů) a lze ho osadit do vlastního zařízení nebo na vývojovou desku poskytovanou výrobcem. Ta je opatřena SMA konektory pro připojení VF signálů a konektory pro napájení a ovládání. Součástí tohoto vývojového kitu je kromě desky pro osazení přepínače i USB modul a obslužný software, pomocí kterého je možné přepínač ovládat z PC.

Tabulka 2.7 Parametry přepínače Peregrine Semiconductor PE42562.

	Peregrine Semiconductor PE42562
Kmitočtový rozsah	9 kHz – 8 GHz
Vložný útlum	0,9 ¹⁾ /1,0 ²⁾ /1,0 ³⁾ dB @ 9 kHz – 100 MHz (max.) 1,0/1,1/1,1 dB @ 100 MHz – 1 GHz (max.) 1,2/1,3/1,3 dB @ 1 GHz – 2 GHz (max.) 1,5/1,6/1,7 dB @ 2 GHz – 4 GHz (max.) 1,9/2,3/2,2 dB @ 4 GHz – 6 GHz (max.)
Izolace mezi porty	35 dB @ 6 GHz (průměrná hodnota, konkrétní hodnota mezi dvěma porty, viz izolační matice v datovém listu)

Napájení	Normal mode – použití interního zdroje záporného napájecího napětí, $V_{SS_EXT} = 0 \text{ V}$ $V_{DD} = 2,3 \text{ až } 5,5 \text{ V (120 } \mu\text{A)}$ Bypass mode ⁴⁾ – připojení externího zdroje záporného napájecího napětí V_{SS_EXT} . $V_{DD} = 3,1 \text{ až } 5,5 \text{ V (80 } \mu\text{A)}$ $V_{SS_EXT} = -3,3 \text{ až } -2,7 \text{ V (-16 } \mu\text{A)}$
Způsob připojení řídicího signálu	Konektorová lišta 2,54 mm
Ovládání	Pomocí tří řídicích vstupů a kombinací nízké a vysoké úrovně

¹⁾ Vložený útlum mezi vstupním portem a výstupním portem 1 nebo 6.

²⁾ Vložený útlum mezi vstupním portem a výstupním portem 2 nebo 5.

³⁾ Vložený útlum mezi vstupním portem a výstupním portem 3 nebo 4.

⁴⁾ Použití bypass mode zlepšuje potlačení nežádoucích signálů.

2.2.3 Koaxiální přepínač 4 a 5

Čtvrtý koaxiální přepínač spolu s pátým slouží k výběru atenuátoru, zesilovače nebo přímého propojení na výstup vysokofrekvenční jednotky. Konfigurace přepínačů je zvolena SP4T s charakteristickou impedancí 50 Ω , kdy 4. vstup je brán jako rezervní.

Protože se mezi touto dvojicí přepínačů nachází zesilovač, tak by přepínače měli být typu absorptive, aby nedocházelo k odrazům, které by mohly způsobit rozkmitání zesilovače. Přepínač by mohly být typu reflective, pokud by při vyřazení zesilovače z VF cesty zároveň došlo k jeho vypnutí.

Možné varianty přepínačů typu SP4T – absorptive/reflective od různých výrobců byly podrobně uvedeny v kapitole 2.2.1 Koaxiální přepínač 1.

2.3 Sada filtrů

Sada filtrů obsahuje celkem 4 filtry a cestu přímého propojení. Výběr filtru probíhá pomocí dvojice koaxiálních přepínačů č. 2 a 3. Přepínače jsou typu SP6T, proto jedna dvojice výstupních portů zůstává volná. Tyto volné porty se budou moci použít pro připojení dalšího filtru a rozšířit tak možnost použití vysokofrekvenční jednotky a celé monitorovací stanice.

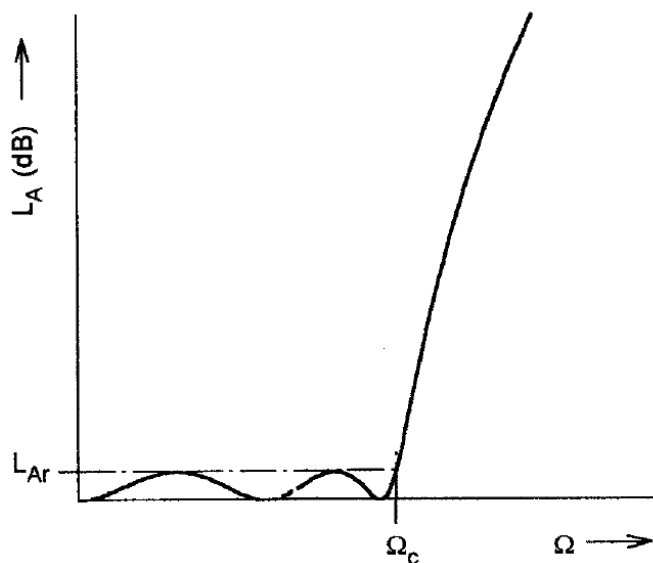
Filtry jsou pasivní, umístěné do stínící krabíčky opatřené SMA konektory pro připojení ke koaxiálním přepínačům.

Návrh filtrů je proveden standardním způsobem, a to pomocí prototypových dolních propustí, které jsou následně přetransformovány na požadovaný typ filtru. Použity jsou dvě aproximace, Chebyshevova a eliptická, a pro ně typické struktury filtrů (prototypových dolních propustí). Tyto dvě aproximace jsou použity z důvodu vysoké strmosti, která je vyžadována, viz parametry filtrů uvedené v tabulkách 2.8, 2.12, 2.16 a 2.17.

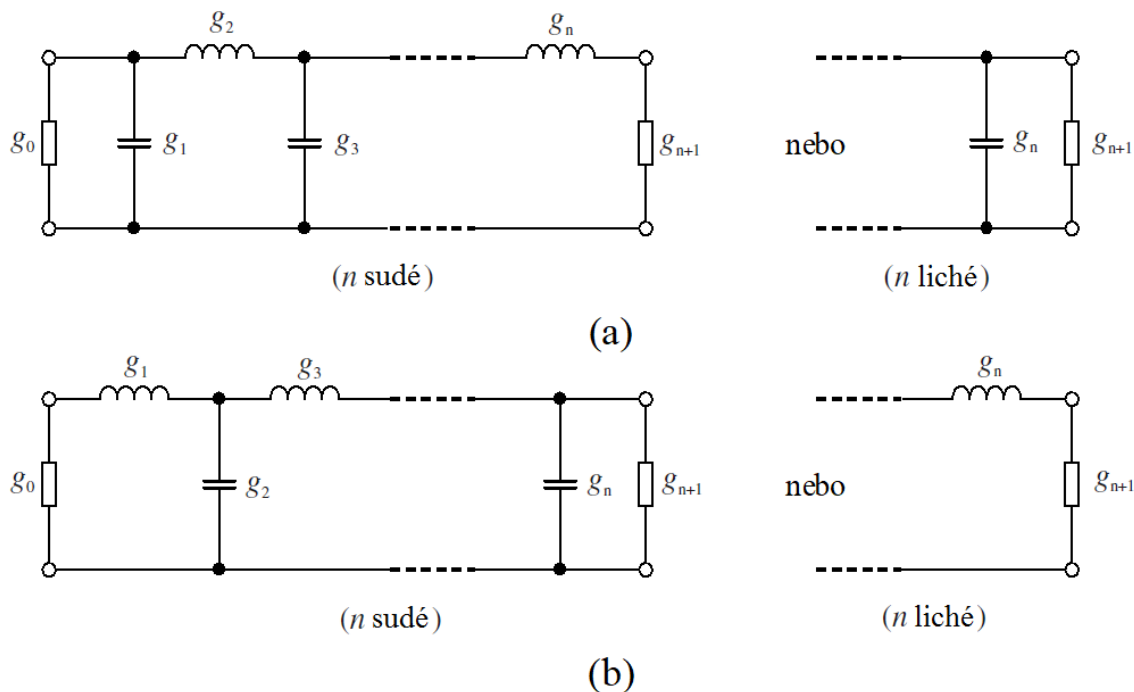
Chebyshevova aproximace:

- Konstantní zvlnění v propustném pásmu.
- Vyšší strmost oproti Besselově a Butterworthově aproximaci.
- Zádržné pásmo ideálně až do nekonečna.

Závislost průchozího útlumu na normovaném kmitočtu je vidět na obrázku 2.12, kde L_{Ar} je zvlnění v propustném pásmu a Ω_c je mezní normovaný kmitočet. Schéma použité prototypové dolní propusti je vidět na obrázku 2.13, kde g_0 je normovaná vodivost zdroje a g_{n+1} je normovaná vodivost zátěže. Ostatní normované vodivosti g_n je možné vypočítat, nebo jsou uvedeny v tabulce.



Obrázek 2.12 Průběh vložného útlumu filtru při použití Chebyshevovy aproximace [8].

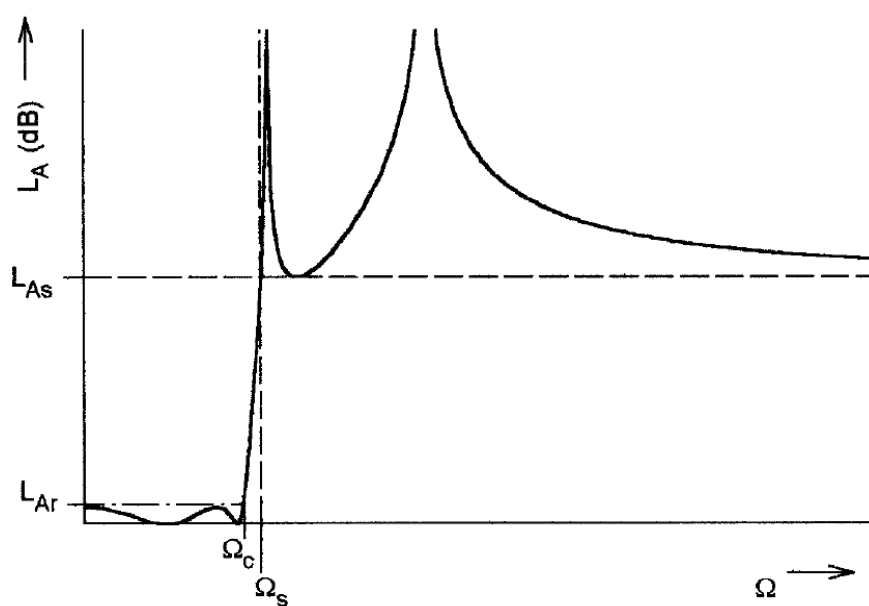


Obrázek 2.13 Schéma příčkového filtru pro Chebyshevovu aproximaci (a) a jeho duálního ekvivalentu (b) pro sudý a lichý řád [8].

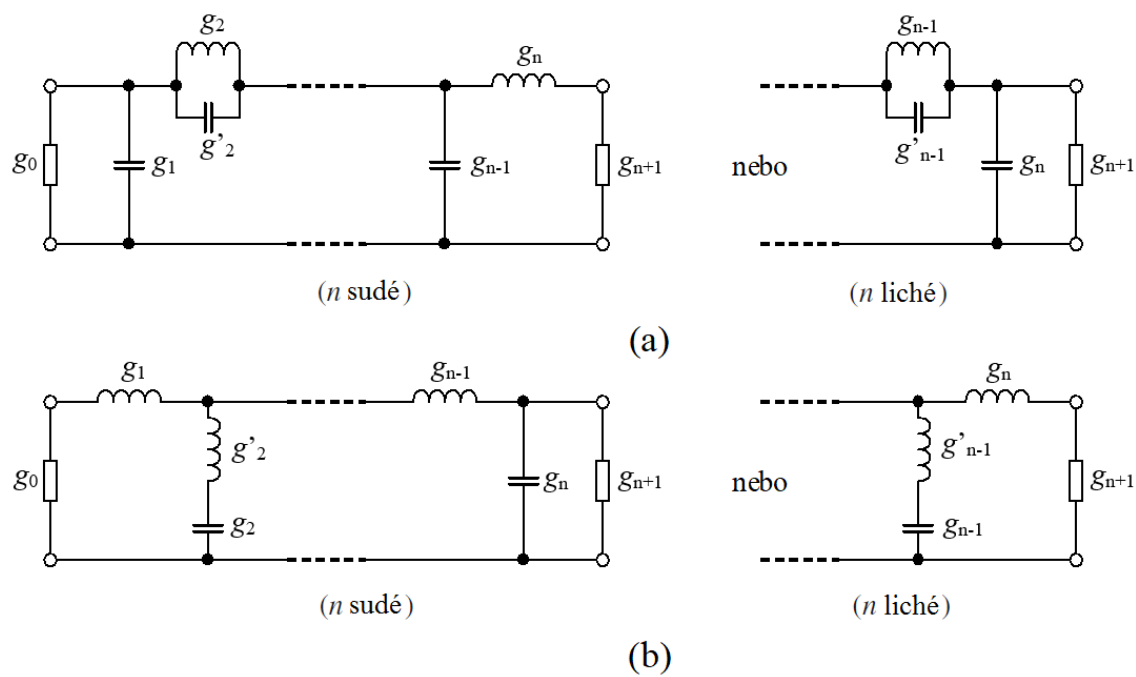
Eliptická aproximace:

- Konstantní zvlnění v propustném i zádržném pásmu.
- Nejvyšší strmost ze všech aproximací.
- Nuly na reálných kmitočtech.

Závislost průchozího útlumu na normovaném kmitočtu je vidět na obrázku 2.14, kde L_{Af} je zvlnění v propustném pásmu, Ω_C je mezní normovaný kmitočet, L_{As} je zvlnění v zádržném pásmu a Ω_S další mezní kmitočet. Schéma použité prototypové dolní propusti je vidět na obrázku 2.15.



Obrázek 2.14 Průběh vložného útlumu filtru při použití eliptické aproximace [8].



Obrázek 2.15 Schéma příčkového filtru pro eliptickou aproximaci (a) a jeho duálního ekvivalentu (b) pro sudý a lichý řád [8].

K návrhu filtrů bude použit nástroj Nuhertz Filter Solutions [9] a MATLAB. Do nástroje jsou zadány požadované parametry filtru a následně vybrána aproximace a struktura filtru, výběr je možný z několika aproximací a struktur. U takto navrženého filtru je možné zobrazit S parametry, rozložení pólů a nul, odezvu v časové oblasti, průběh vstupní a výstupní impedance nebo přenosovou funkci. Další funkcí je možnost vložit hodnoty běžně dostupných součástek, jejich toleranci, parazitní vlastnosti a zjistit vliv na parametry filtru. Výsledky návrhu lze poté exportovat k dalšímu zpracování.

2.3.1 Dolní propust s mezním kmitočtem 1 GHz

Požadavky na průchozí útlum a poměr stojatých vln v závislosti na kmitočtu jsou uvedeny v tabulce 2.8.

Tabulka 2.8 Parametry filtru typu dolní propust 1 GHz.

Kmitočet/pásmo [GHz]	Průchozí útlum [dB]	PSV [-]
0 – 1,0	<3	-
1,2	>20	-
1,3 – 6,0	>40	-
0 – 0,95	-	<1,5

Tento filtr bude realizován jako planární z úseků mikropáskového vedení. Proto se pro dosažení požadovaných parametrů bude uvažovat pouze eliptická aproximace. Při použití Chebyshevovy aproximace by bylo třeba filtru vysokého řádu, a to zejména kvůli dosažení požadované strmosti. Dalším omezením při této realizaci je možnost použití pouze zapojení s kapacitním úsekem v příčné větvi, viz obrázek 2.16 (kapacita v podélné větvi nelze realizovat – vedení by muselo být přerušeno).

Pro návrh byl vytvořen skript v MATLABu, viz elektronické přílohy, který byl částečně převzat z [10]. Slouží k přepočtu normovaných vodivostí na hodnoty prvků L a C a následně k výpočtu rozměrů mikropáskových úseků vedení. Do tohoto skriptu lze zadat hodnoty normovaných vodivostí z tabulky [8] dle výběru řádu filtru a normovaného mezního kmitočtu pro konstantní zvlnění v zádržném pásmu anebo rovnou hodnoty jednotlivých prvků L a C .

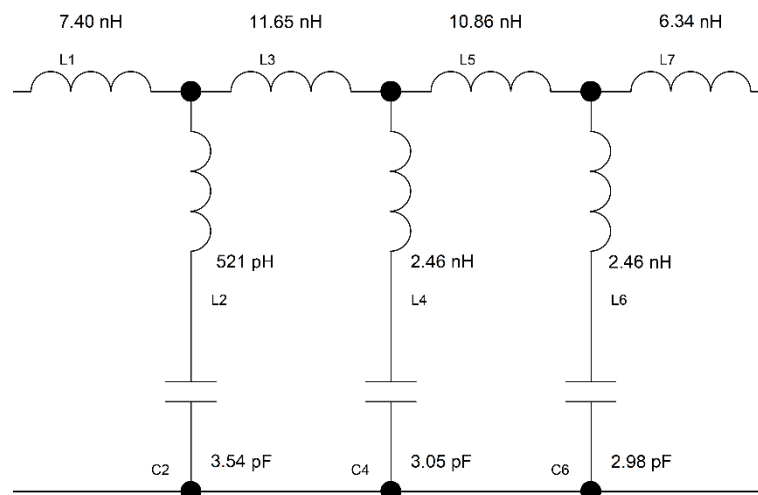
Pro dosažení požadovaných vlastností byl nejprve zvolen filtr 7. řádu a poté ještě pro srovnání filtr 11. řádu. Na základě měření realizovaného vzorku bude poté použit ten, který splní požadované parametry anebo dosáhne lepších parametrů.

Při návrhu filtru 7. řádu byly použity hodnoty normovaných vodivostí z [8], viz tabulka 2.9, které byly poté transformovány na hodnoty prvků L a C pro dolní propust.

Tabulka 2.9 Hodnoty normovaných vodivostí pro eliptickou aproximaci 7. řádu [8].

Ω_S	L_{As}	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7
1,4085	66,7795	1,1034	1,3189	1,8177	1,2583	1,5856	0,8983	0,7755
Ω_S	L_{As}	g'_2	g'_4	g'_6				
1,4085	66,7795	0,0940	0,2770	0,2770				

Pro návrh byly zvoleny tyto parametry: mezní kmitočet propustného pásma 1 GHz, mezní kmitočet zádržného pásma 1,4 GHz a maximální zvlnění v propustném pásmu 0,1 dB. Výsledkem je zapojení s hodnotami prvků L a C, viz obrázek 2.16.



Obrázek 2.16 Schéma filtru dolní propust 1 GHz 7. řádu při použití eliptické aproximace.

Dalším krokem byl přepočet hodnot prvků L a C na kapacitní a induktivní úseky mikropáskového vedení. Pro realizaci byl zvolen substrát Arlon 600 s výškou $h = 1,575$ mm, $\epsilon_r = 6,15$ a ztrátovým úhlem $\tan \delta = 0,003$.

Při volbě impedance kapacitních a induktivních úseků byl brán ohled na výrobní limity a na to, aby nevycházely komplexní hodnoty délek úseků:

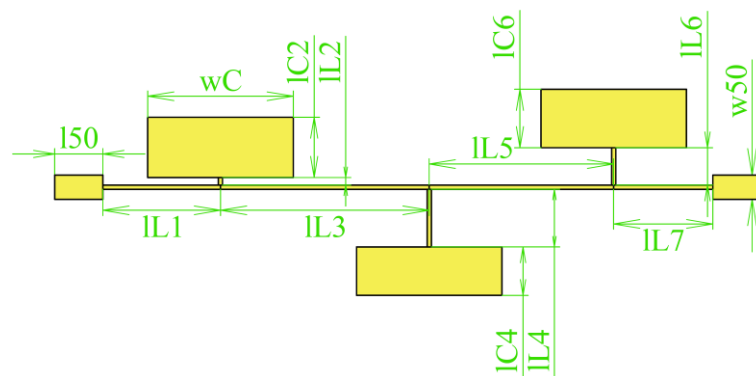
$Z_{50} = 50 \Omega$ (impedance přívodních úseků vedení)

$Z_L = 104 \Omega$ (impedance induktivních úseků vedení)

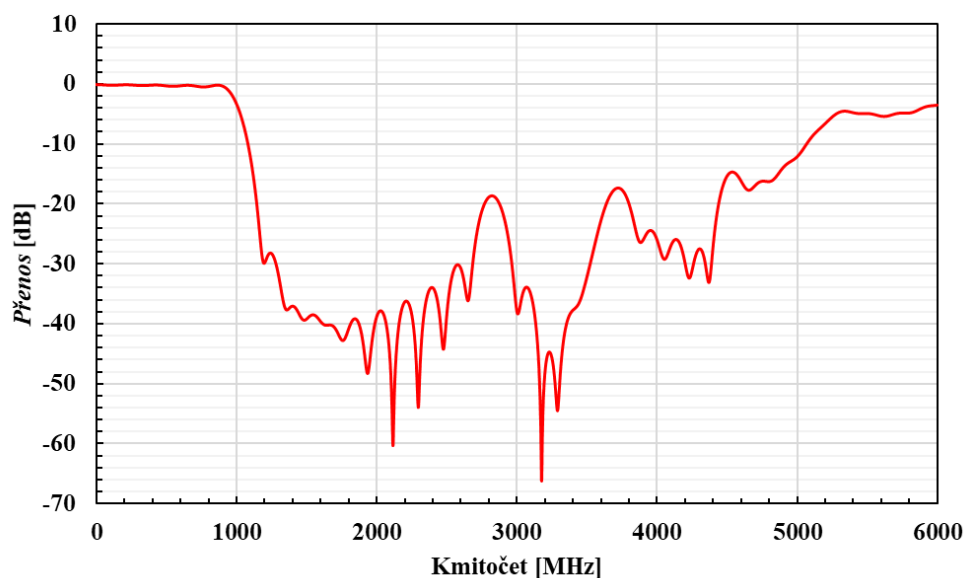
$Z_C = 14 \Omega$ (impedance kapacitních úseků vedení)

Výsledný motiv filtru byl modelován a simulován v programu CST Studio Suite. Tento motiv spolu s okótovanými rozměry je vidět na obrázku 2.17 a rozměry jsou pak uvedeny v tabulce 2.10, tyto rozměry jsou již po optimalizaci k dosažení požadovaných parametrů.

V grafu na obrázku 2.18 je vidět průběh přenosu (S_{21}) ze simulace v CST.

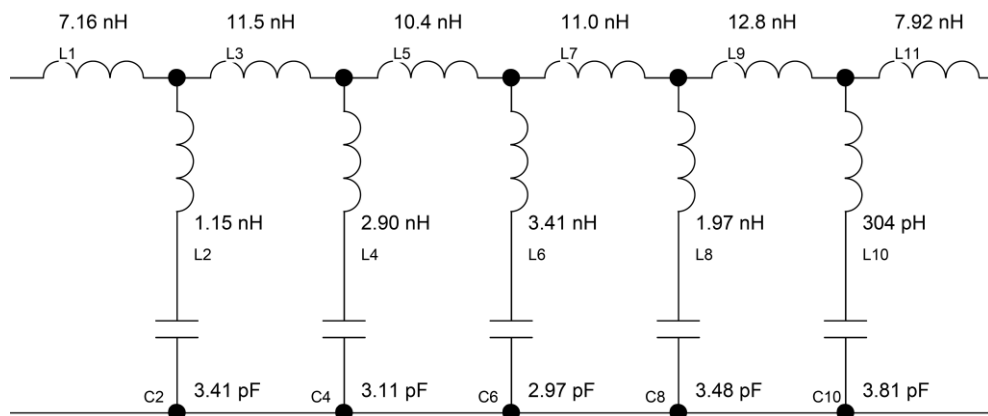


Obrázek 2.17 Struktura mikropáskového filtru dolní propust 1 GHz 7. řádu s rozměry jednotlivých úseků (neodpovídá skutečné velikosti).



Obrázek 2.18 Graf průběhu *přenosu* filtru dolní propust 1 GHz 7. řádu v závislosti na kmitočtu pro mikropáskový návrh v CST.

Pro filtr 11. řádu byl použit návrhový nástroj Nuhertz Filter Solutions [9], protože pro tento řád nejsou v tabulce [8] k dispozici hodnoty normovaných vodivostí. V návrhovém nástroji byly zadány požadované parametry: mezní kmitočet propustného pásma 1 GHz, mezní kmitočet zádržného pásma 1,4 GHz a maximální zvlnění v propustném pásmu 0,1 dB. Výsledkem je zapojení s hodnotami prvků L a C, viz obrázek 2.19. Tento návrhový nástroj neumožňuje zobrazit hodnoty normovaných vodivostí g.



Obrázek 2.19 Schéma filtru dolní propust 1 GHz 11. řádu při použití eliptické aproximace (vytvořeno v nástroji Nuhertz Filter Solutions).

Další postup byl stejný jako u návrhu filtru 7. řádu. Byl zvolen stejný substrát a následující impedance kapacitních a induktivních úseků vedení:

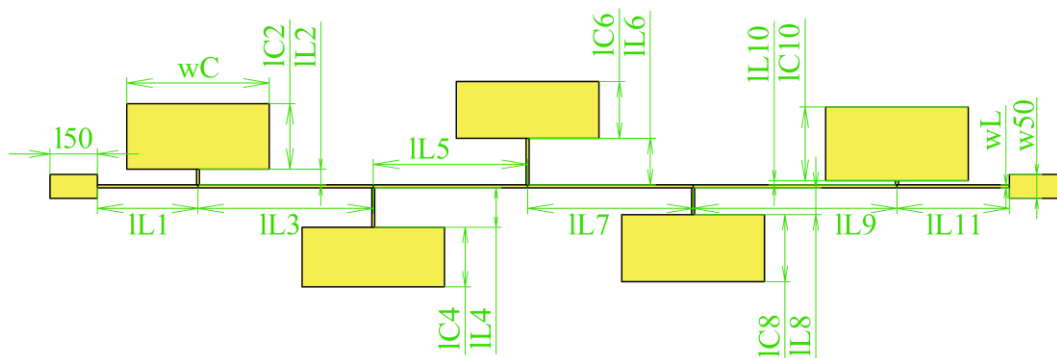
$Z_{50} = 50 \, \Omega$ (impedance přívodních úseků vedení)

$Z_L = 114 \, \Omega$ (impedance induktivních úseků vedení)

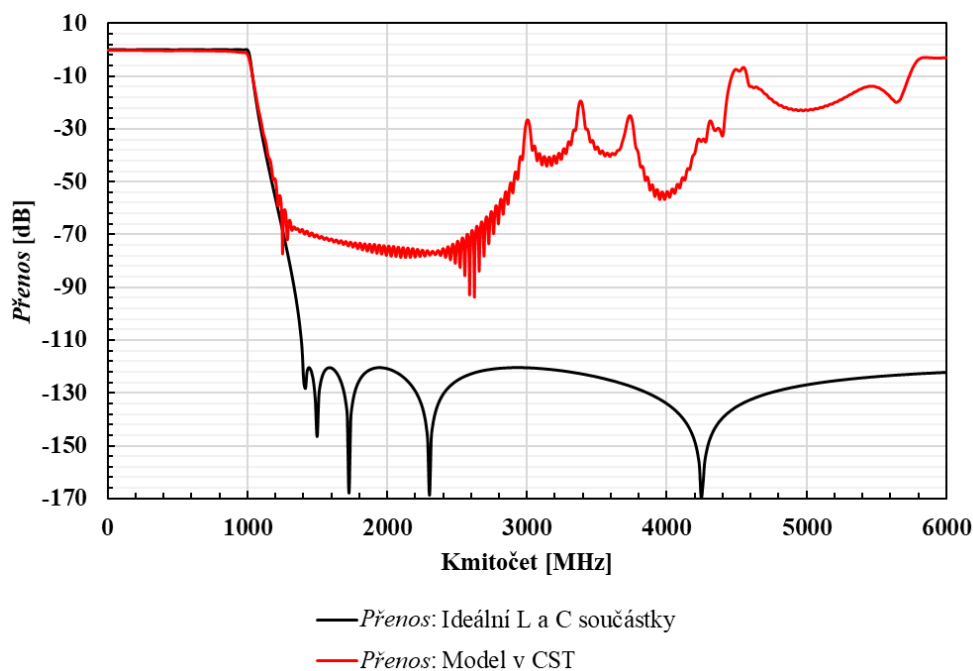
$Z_C = 14 \, \Omega$ (impedance kapacitních úseků vedení)

Motiv filtru spolu s okótovanými rozměry je vidět na obrázku 2.20 a rozměry jsou pak uvedeny v tabulce 2.11, tyto rozměry jsou již po optimalizaci k dosažení požadovaných parametrů.

V grafu na obrázku 2.21 je vidět průběh přenosu, a to pro výsledek z návrhového nástroje Nuhertz Filter Solutions – ideální L a C součástky a výsledek ze simulace v CST.



Obrázek 2.20 Struktura mikropáskového filtru dolní propust 1 GHz 11. řádu s rozměry jednotlivých úseků (neodpovídá skutečné velikosti).



Obrázek 2.21 Graf průběhu přenosu filtru dolní propust 1 GHz 11. řádu v závislosti na kmitočtu, a to pro ideální L a C strukturu navrženou v Nuhertz Filter Solutions a pro mikropáskový návrh v CST.

Jak je vidět v předchozích grafech, tak není splněn požadavek na vložený útlum v celém zádržném pásmu (min. 40 dB) jak pro filtr 7. řádu, tak ani pro filtr 11. řádu. Proto byl navrhnout ještě jeden filtr stejného typu s mezním kmitočtem 2,5 GHz, který zajišťuje dostatečný útlum ke konci zádržného pásma. Návrh probíhal stejným způsobem jako u předchozích filtrů (7. řád – tabulka normovaných vodivostí, 11. řád – návrhový nástroj Nuhertz Filter Solutions).

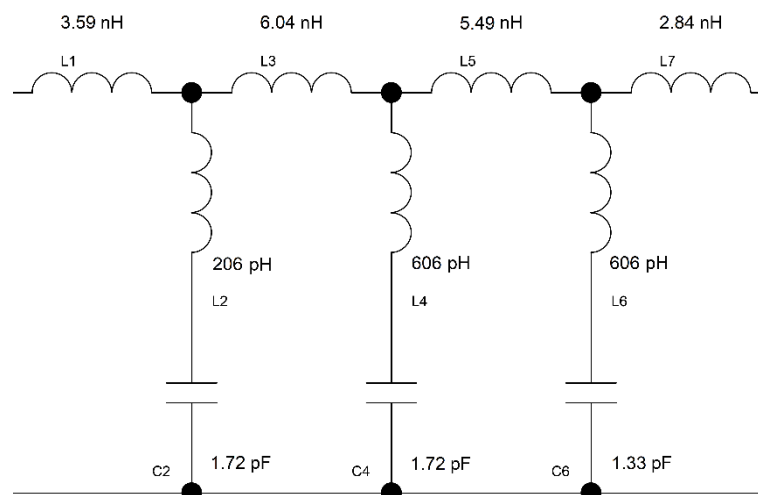
Výsledek pro filtr 7. řádu je vidět na obrázcích 2.22, 2.23 a 2.24. Rozměry jsou pak uvedeny v tabulce 2.10. Impedance kapacitních a induktivních úseků byly opět vhodně zvoleny:

$Z_{50} = 50 \, \Omega$ (impedance přívodních úseků vedení)

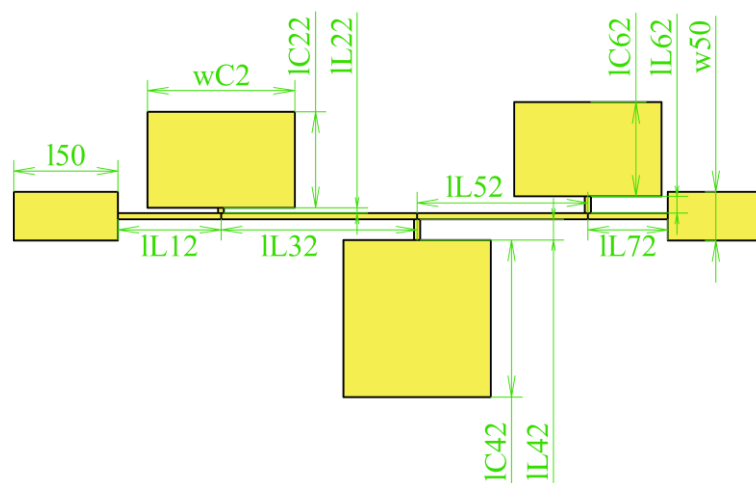
$Z_L = 104 \, \Omega$ (impedance induktivních úseků vedení)

$Z_C = 24 \, \Omega$ (impedance kapacitních úseků vedení)

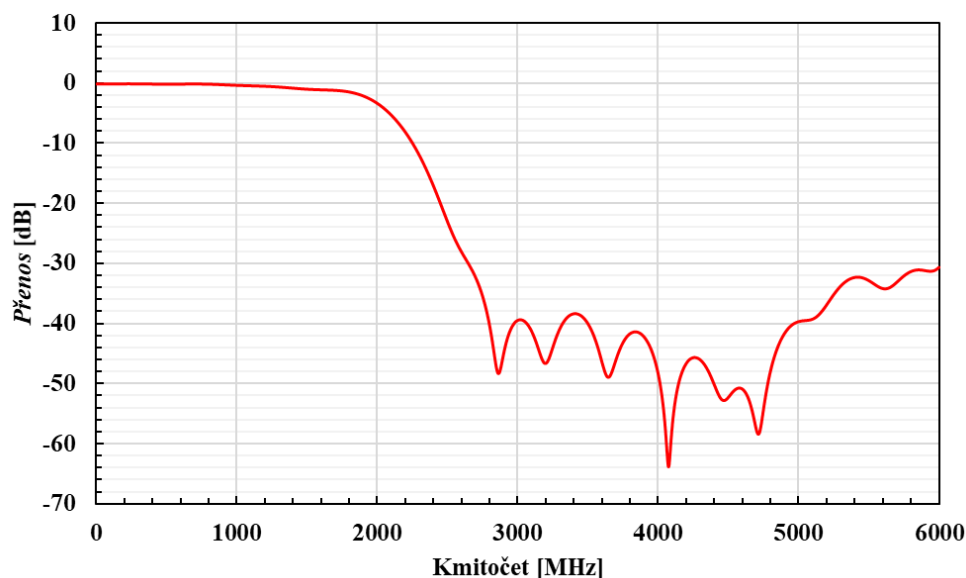
Tento filtr bude spolu s filtrem s mezním kmitočtem 1 GHz tvořit kaskádu.



Obrázek 2.22 Schéma filtru dolní propust 2,5 GHz 7. řádu při použití eliptické aproximace.



Obrázek 2.23 Struktura mikropáskového filtru dolní propust 2,5 GHz 7. řádu s rozměry jednotlivých úseků (neodpovídá skutečné velikosti).



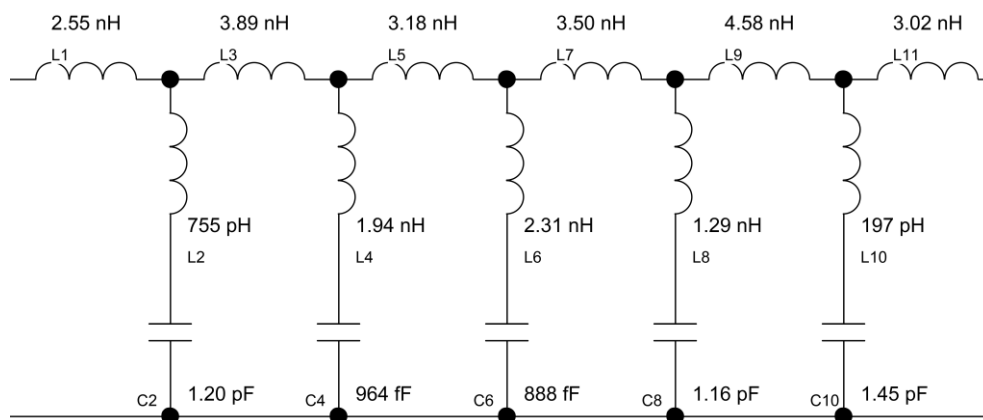
Obrázek 2.24 Graf průběhu *přenosu* filtru dolní propust 2,5 GHz 7. řádu v závislosti na kmitočtu pro mikropáskový návrh v CST.

Výsledek pro filtr 11. řádu je vidět na obrázcích 2.25, 2.26 a 2.27. Rozměry jsou pak uvedeny v tabulce 2.11. Impedance kapacitních a induktivních úseků byly zvoleny takto:

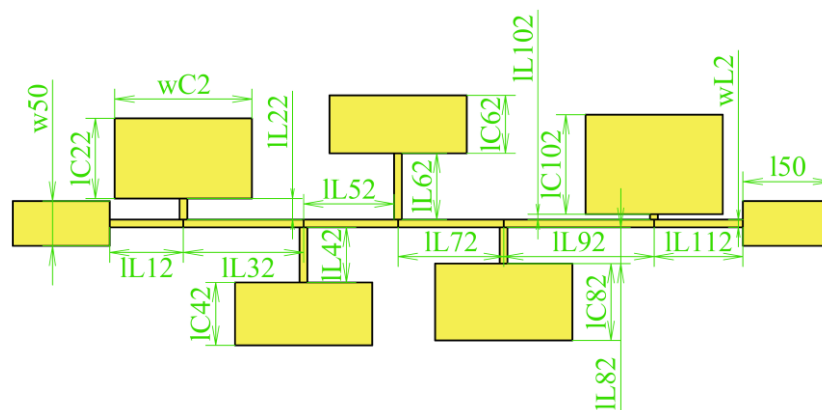
$Z_{50} = 50 \, \Omega$ (impedance přívodních úseků vedení)

$Z_L = 104 \, \Omega$ (impedance induktivních úseků vedení)

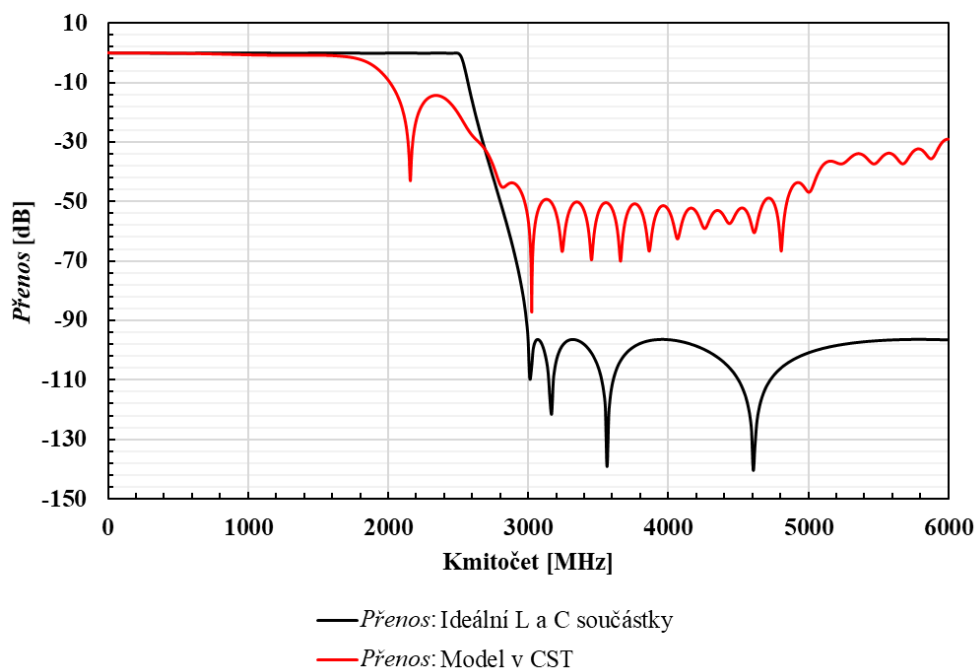
$Z_C = 24 \, \Omega$ (impedance kapacitních úseků vedení)



Obrázek 2.25 Schéma filtru dolní propust 2,5 GHz 11. řádu při použití eliptické aproximace (vytvořeno v nástroji Nuhertz Filter Solutions).



Obrázek 2.26 Struktura mikropáskového filtru dolní propust 2,5 GHz 11. řádu s rozměry jednotlivých úseků (neodpovídá skutečné velikosti).



Obrázek 2.27 Graf průběhu přenosu filtru dolní propust 2,5 GHz 11. řádu v závislosti na kmitočtu, a to pro ideální L a C strukturu navrženou v Nuhertz Filter Solutions a pro mikropáskový návrh v CST.

Tabulka 2.10 Rozměry jednotlivých úseků vedení pro filtry dolní propust 1 GHz a 2,5 GHz 7. řádu.

Označení	Rozměr [mm]
w50	2,320
wC	13,88
wL	0,400
IL1	11,21
IL2	0,720

Označení	Rozměr [mm]
wC2	7,070
wL2	0,290
150	5,000
IL12	4,940
IL22	0,250

1C2	5,740
IL3	19,91
IL4	5,490
1C4	4,610
IL5	17,89
IL6	3,560
1C6	5,560
IL7	9,450

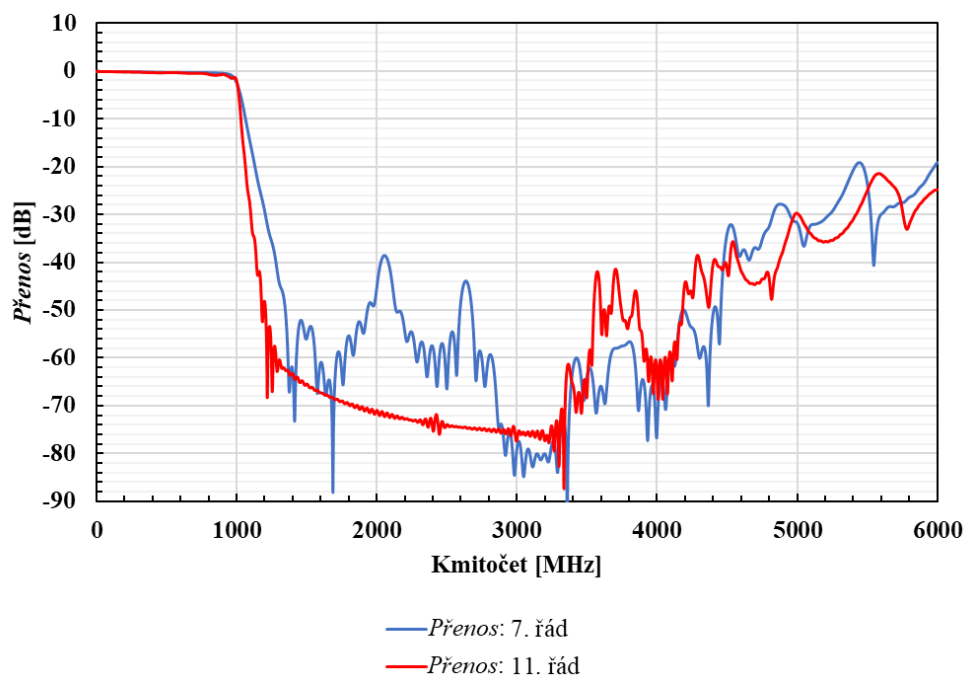
1C22	4,610
IL32	9,410
IL42	0,990
1C42	7,510
IL52	8,190
IL62	0,800
1C62	4,520
IL72	3,840

Tabulka 2.11 Rozměry jednotlivých úseků vedení pro filtry dolní propust 1 GHz a 2.5 GHz 11. řádu.

Označení	Rozměr [mm]
w50	2,320
wC	13,88
wL	0,290
IL1	9,800
IL2	1,520
1C2	6,390
IL3	17,06
IL4	3,840
1C4	5,800
IL5	15,02
IL6	4,530
1C6	5,530
IL7	16,11
IL8	2,600
1C8	6,520
IL9	19,83
IL10	0,400
1C10	7,180
IL11	10,95

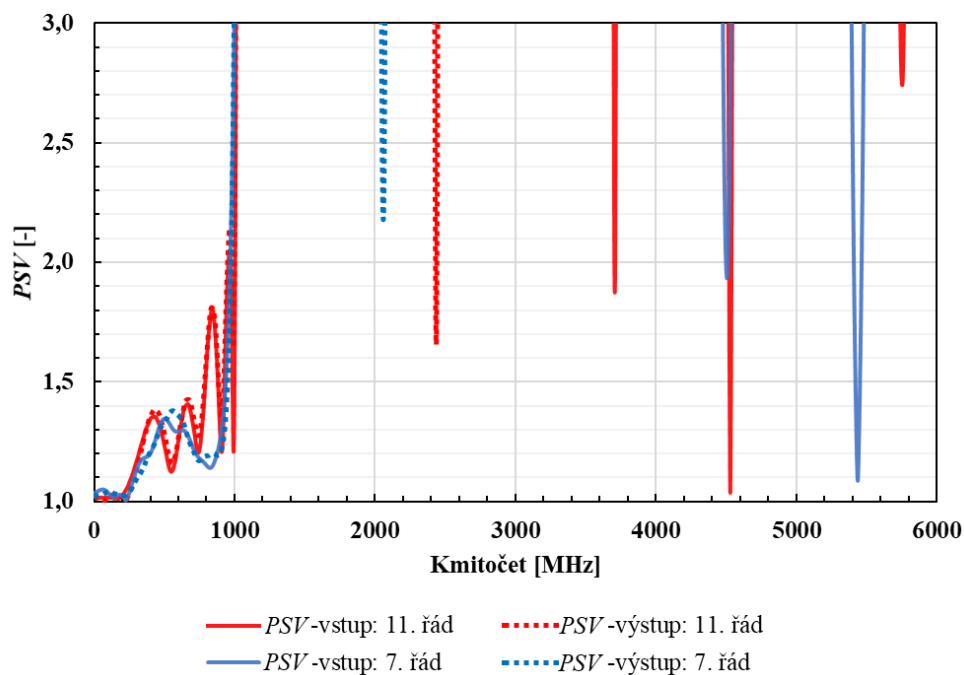
Označení	Rozměr [mm]
wC2	7,070
wL2	0,400
l50	5,000
IL12	3,800
IL22	1,090
1C22	4,120
IL32	6,190
IL42	2,840
1C42	3,240
IL52	4,860
IL62	3,420
1C62	2,970
IL72	5,440
IL82	1,860
1C82	3,960
IL92	7,750
IL102	0,280
1C102	5,130
IL112	4,590

V následujících grafech je vidět průběh přenosu a *PSV* pro kaskádu filtrů dolní propust 1 GHz a 2,5 GHz 7. a 11. řádu – simulace v CST. Realizace spolu s měřením požadovaných parametrů je popsána v kapitole 3.2.1 Dolní propust s mezním kmitočtem 1 GHz.



Obrázek 2.28 Graf průběhu *přenosu* kaskády filtrů dolní propust v závislosti na kmitočtu pro mikropáskový návrh v CST.

V předchozím grafu je vidět, že kaskáda 7. ani 11. řádu nesplňuje ke konci pásma podmínku na vložný útlum (min. 40 dB). Proto budou filtry dále upravovány pro zlepšení vložného útlumu v této části zádržného pásma, viz kapitola 3.2.1 Dolní propust s mezním kmitočtem 1 GHz.



Obrázek 2.29 Graf průběhu *PSV* kaskády filtrů dolní propust v závislosti na kmitočtu pro mikropáskový návrh v CST.

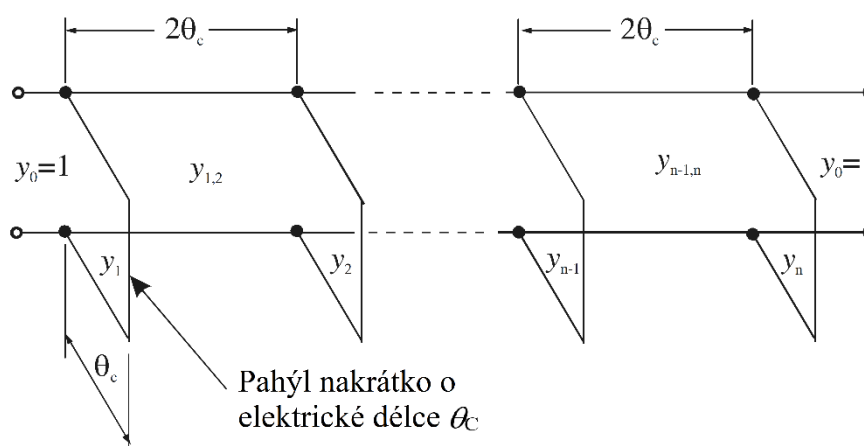
2.3.2 Horní propust s mezním kmitočtem 1,1 GHz

Požadavky na průchozí útlum a poměr stojatých vln v závislosti na kmitočtu jsou uvedeny v tabulce 2.12. Z důvodu většího potlačení pásem LTE 800 a GSM 900 byl mezní kmitočet filtru posunut na 1,1 GHz oproti 1 GHz, který je uvedený v zadání práce.

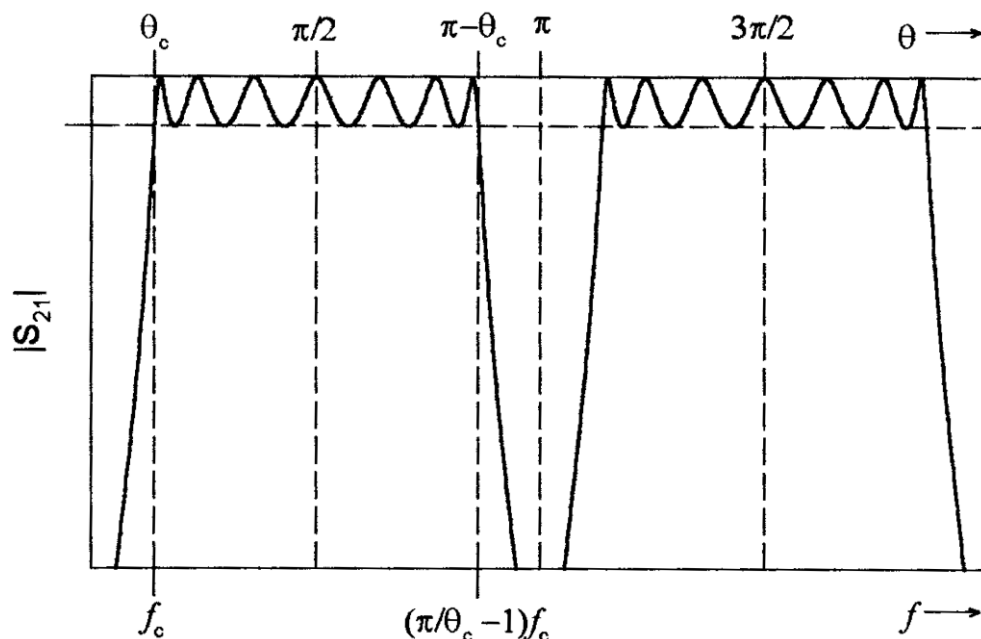
Tabulka 2.12 Parametry filtru typu horní propust 1,1 GHz.

Kmitočet/pásmo [GHz]	Průchozí útlum [dB]	PSV [-]
0 – 0,88	>30	-
0,95	>10	-
1,1– 6,0	<3	-
1,2 – 6,0	-	<1,5

Tento filtr bude realizován jako planární z úseků mikropáskového vedení, a to jako tzv. Optimum Distributed High Pass Filter, název z [8]. Tento typ filtru se skládá z kaskády pahýlů nakrátko o elektrické délce θ_c na konkrétním kmitočtu, většinou mezním f_c . Tyto pahýly jsou spojené úseky vedení o elektrické délce $2\theta_c$. Tento typ filtru se skládá z n pahýlů, ale jeho přenosová funkce je řádu $2n-1$. Schéma tohoto filtru je znázorněno na obrázku 2.30, který byl převzat z [8] a kde y_n a $y_{n,n}$ jsou normované charakteristické admitance. Typická přenosová charakteristika je vidět na obrázku 2.31 [8]. Filtr má propustné pásmo od θ_c do $\pi-\theta_c$, s mezí na θ_c . Propustné pásmo se periodicky opakuje se středem na $\theta = 3\pi/2, 5\pi/2, \dots$ a je odděleno útlumovými póly umístěnými na $\theta = \pi, 2\pi, \dots$



Obrázek 2.30 Schéma mikropáskového filtru horní propust [8].



Obrázek 2.31 Typická přenosová charakteristika mikropáskového filtru horní propust [8].

Návrh tohoto filtru bude probíhat ve vytvořeném skriptu v MATLABu, viz elektronické přílohy a následná simulace a optimalizace rozměrů v CST Studio Suite.

Nejdříve bylo třeba zjistit elektrickou délku θ_c , která se vypočítá jako

$$\theta_c = \frac{\pi}{\left(\frac{f_s}{f_c}\right)_{+1}}, \quad (2.1)$$

kde f_s je horní kmitočet propustného pásma a f_c je mezní kmitočet filtru. Následně je třeba ještě přepočítat θ_c na hodnotu ve stupních.

Pro $f_c = 1,1$ GHz a $f_s = 6,5$ GHz vychází elektrická délka $\theta_c = 28,66^\circ$. Teoreticky lze u tohoto typu filtru dosáhnout velmi širokého propustného pásma, pokud θ_c bude velmi malé. To by však vedlo k tomu, že impedance pahýlů nakrátko by byla velmi vysoká, a tím pádem šířka vedení velmi malá a nerealizovatelná běžnými výrobními postupy. Proto jsou v následující tabulce 2.13 uvedeny hodnoty normalizovaných charakteristických admitancí pouze pro $\theta_c = 25^\circ$, 30° a 35° a pro $n = 6$ (6 pahýlů).

Tabulka 2.13 Hodnoty normalizovaných charakteristických admitancí pro $n = 6$ [8].

n	θ_c [°]	y_1	$y_{1,2}$	y_2	$y_{2,3}$	y_3	$y_{3,4}$
6	25	0,25038	1,10199	0,29073	1,08725	0,33031	1,08302
	30	0,35346	1,06720	0,46383	1,04395	0,52615	1,03794
	35	0,48096	1,02354	0,68833	0,99126	0,77546	0,98381

Protože v tomto případě je elektrická délka $\theta_c = 28,66^\circ$, tak budou hodnoty normalizovaných charakteristických admitancí interpolovány z hodnot pro $\theta_c = 25^\circ$ a $\theta_c = 30^\circ$.

Hodnoty charakteristických normovaných admitancí je třeba transformovat na hodnoty charakteristických impedancí jednotlivých úseků vedení, to je provedeno podle následujících vztahů

$$Z_n = \frac{Z_0}{y_n} \quad (2.2)$$

a

$$Z_{n,n+1} = \frac{Z_0}{y_{n,n+1}}, \quad (2.3)$$

kde Z_0 je charakteristická impedance vstupu a výstupu, y_n a $y_{n,n}$ jsou normované charakteristické admitance. Výsledky jsou vidět v následující tabulce 2.14.

Tabulka 2.14 Hodnoty normalizovaných charakteristických admitancí a charakteristických impedancí jednotlivých úseků.

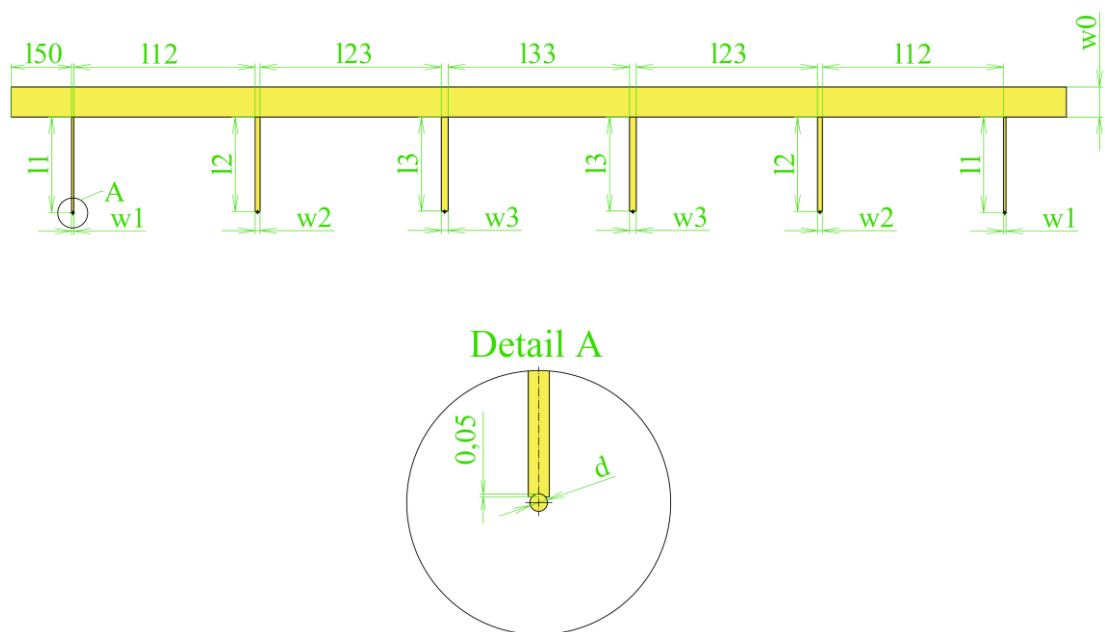
θ_c [°]	y_1	$y_{1,2}$	y_2	$y_{2,3}$	y_3	$y_{3,4}$
28,66	0,25038	1,10199	0,29073	1,08725	0,33031	1,08302
	Z_1	$Z_{1,2}$	Z_2	$Z_{2,3}$	Z_3	$Z_{3,4}$
	153,4	46,45	119,8	47,37	105,5	47,62

Filtr bude realizován na substrátu IsoClad 933 s výškou $h = 1,524$ mm, $\varepsilon_r = 2,33$ a ztrátovým úhlem $\tan \delta = 0,0013$. Z těchto hodnot budou následně vypočítané rozměry příslušných úseků vedení. Struktura je symetrická dle svého středu, takže první a šestý pahýl mají stejnou impedanci a stejné rozměry, stejně tak i první a pátý úsek spojovacího vedení.

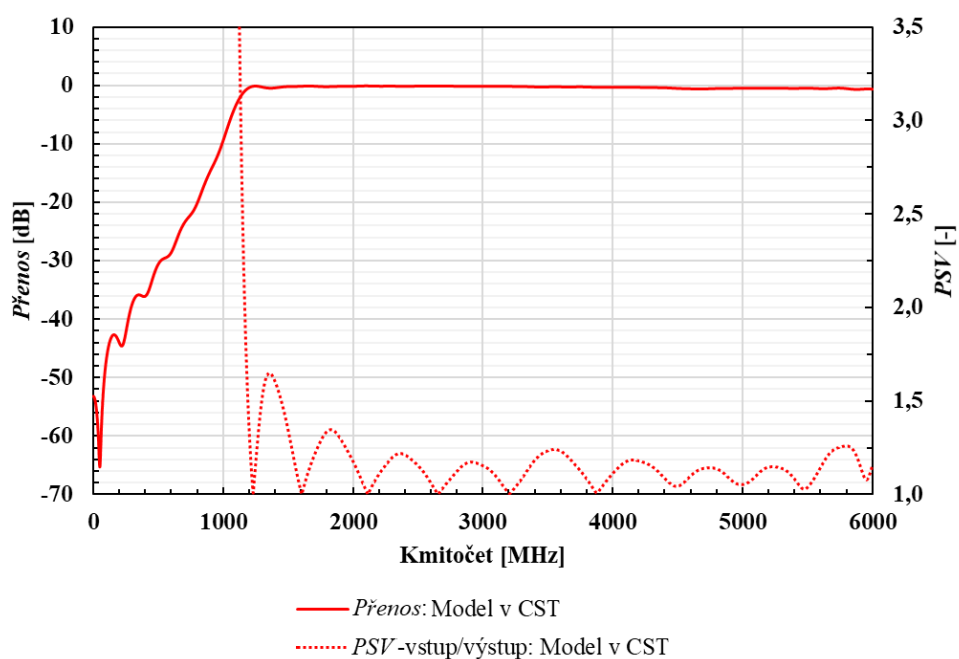
Dle [8] byla zvolena stejná šířka přívodních úseků vedení (I50) a spojovacích úseků vedení (I12, I23 a I33), která je určena jako průměr ze všech hodnot lišících se jen nepatrně. Navržený motiv filtru je vidět spolu s okótovanými rozměry na obrázku 2.32 a rozměry pak v tabulce 2.15. Rozměry jsou už po optimalizaci pro dosažení požadovaných parametrů. Pahýly byly v prvním vyrobeném vzorku zkratovány pomocí chemicky vyrobeného prokovu, kdy je možné v případě tohoto substrátu prokovit otvor 0,6 mm. Jelikož je šířka nejúžšího pahýlu $w_1 = 0,360$ mm, muselo být kolem otvoru vytvořeno mezikruží, které umožňovalo uchycení mědi při chemickém prokovování. Tento způsob se ukázal jako nevhodný, při prokovování nebyly všechny pahýly zkratované.

Na základě předchozí zkušenosti byl návrh upraven tak, že bude na konci pahýlu pouze vyvrtán otvor o průměru 0,3 mm a jím následně provlečen měděný drát o průměru 0,3 mm a přiletován na straně zemní plochy a z druhé strany k pahýlu.

Výsledky simulací navrženého filtru v CST jsou vidět na obrázku 2.33. Realizace spolu s měřením požadovaných parametrů je popsána v kapitole 3.2.2 Horní propust s mezním kmitočtem 1,1 GHz.



Obrázek 2.32 Struktura mikropáskového filtru horní propust 1,1 GHz s rozměry jednotlivých úseků (neodpovídá skutečné velikosti).



Obrázek 2.33 Graf průběhu přenosu a PSV filtru horní propust 1,1 GHz v závislosti na kmitočtu pro mikropáskový návrh v CST.

Tabulka 2.15 Rozměry jednotlivých úseků vedení pro filtr horní propust 1,1 GHz.

Označení	Rozměr [mm]
w50	4,530
150	5,000

l12	27,30
l23	27,32
l33	27,33
l1	14,37
l2	14,23
l3	14,17
w1	0,360
w2	0,730
w3	1,020
d	0,300

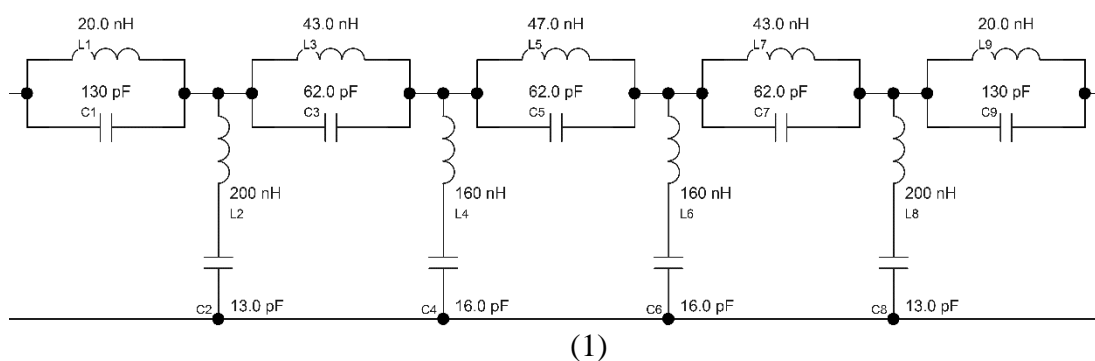
2.3.3 Pásmová zadrž pro pásmo VKV-FM

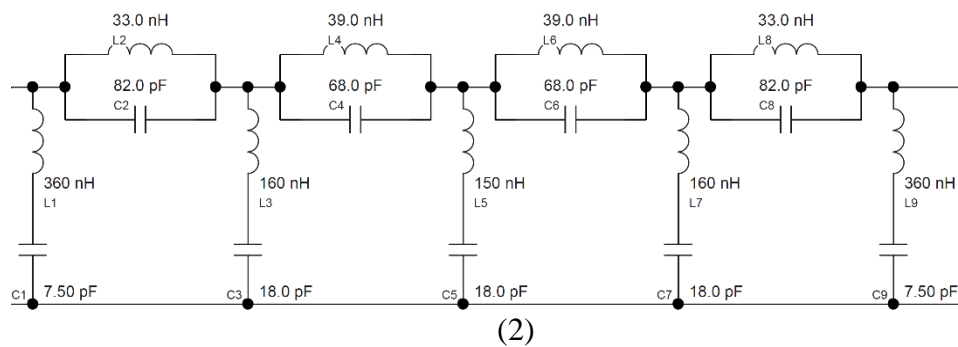
Požadavky na průchozí útlum a poměr stojatých vln v závislosti na kmitočtu jsou uvedeny v tabulce 2.16.

Tabulka 2.16 Parametry filtru typu pásmová zadrž pro FM pásmo.

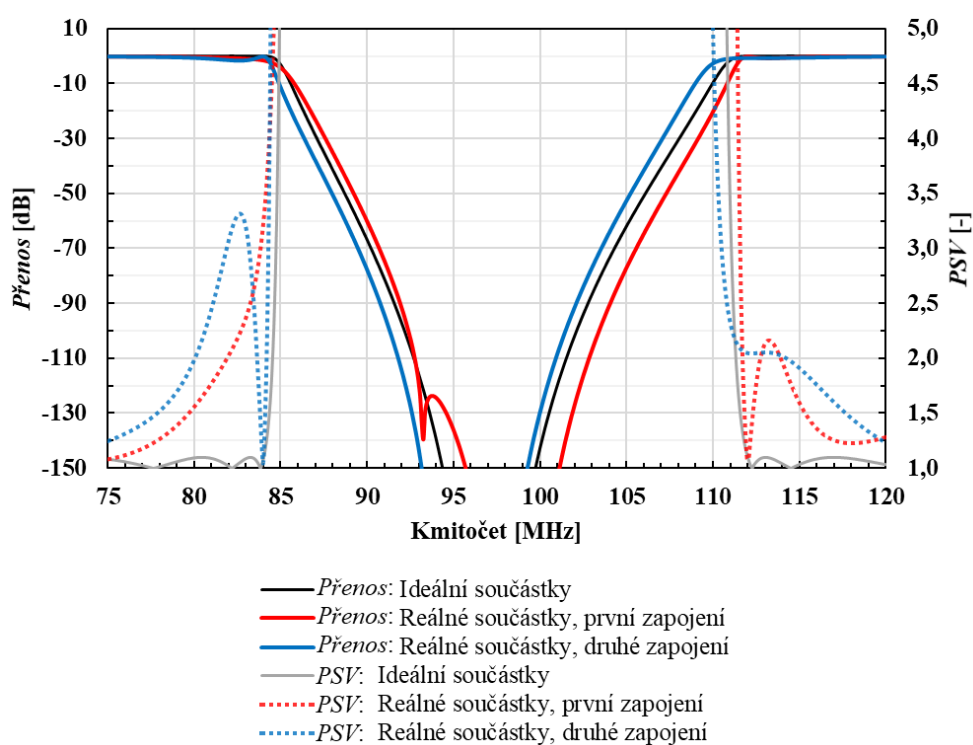
Kmitočet/pásmo [MHz]	Průchozí útlum [dB]	<i>PSV</i> [-]
0 – 84	<3	<1,8
112 – 1000	<3	<1,8
87,5	>20	-
108	>20	-
90 – 105	>40	-

Návrh filtru probíhal v nástroji Nuhertz Filter Solutions [9]. Výsledek při použití Chebyshevovy aproximace je vidět na obrázku 2.34 a 2.35. Pro dosažení dostatečné strmosti byl zvolen devátý řád filtru. Při výpočtu byly nejprve vybrány ideální součástky a poté reálné součástky s tolerancí 5 %, jejichž hodnoty jsou uvedeny ve schématu na obrázku 2.34. Prozatím nebyly uvažovány jejich parazitní vlastnosti.



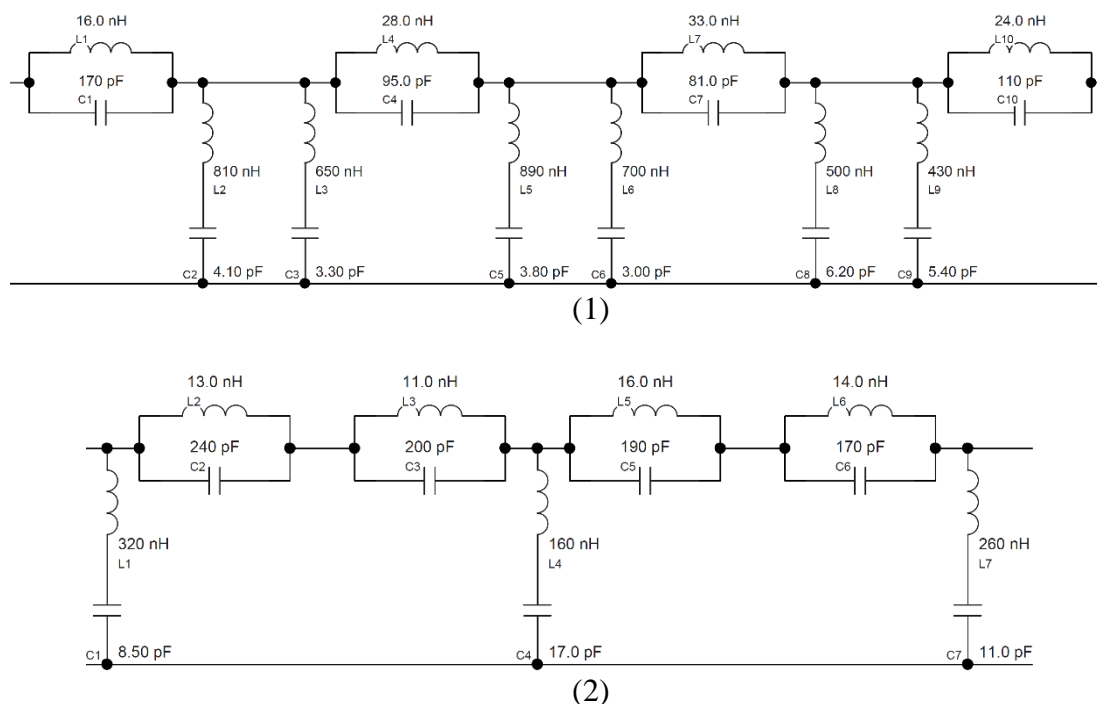


Obrázek 2.34 První (1) a druhé (2) možné zapojení LC filtru typu pásmová zadrž 9. řádu pro FM pásmo při použití Chebyshevovy aproximace [9].

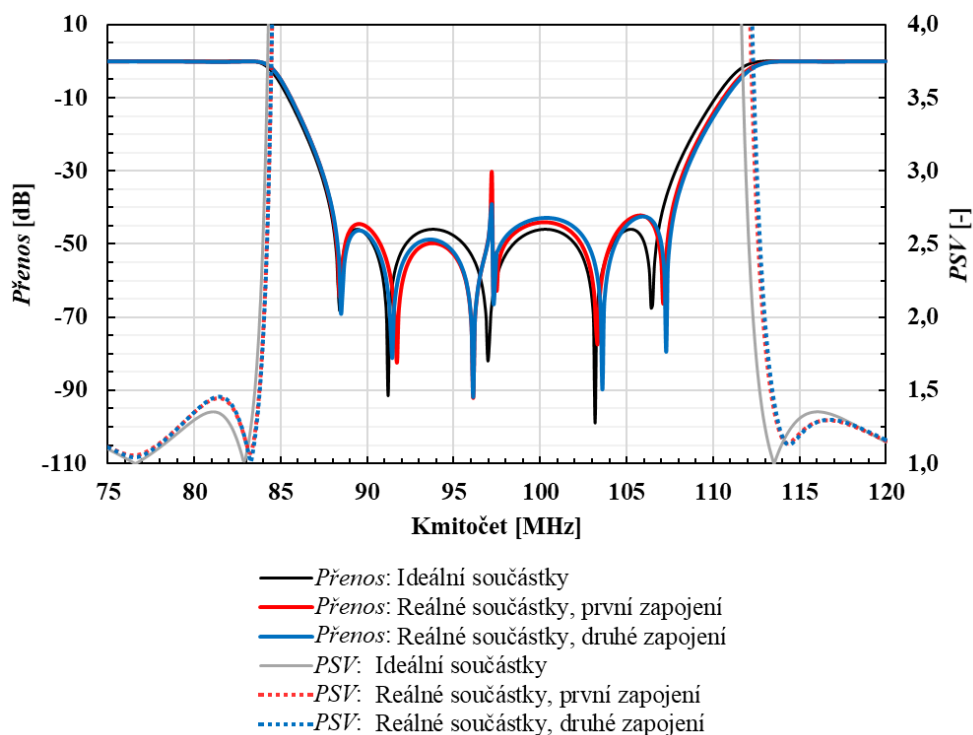


Obrázek 2.35 Graf průběhu přenosu a PSV pásmové zadržky FM pásma v závislosti na kmitočtu pro Chebyshevovu aproximaci.

Výsledek při použití eliptické aproximace je vidět na obrázku 2.36 a 2.37. Pro dosažení požadované strmosti postačuje pátý řád filtru. Při výpočtu byly nejprve zvoleny ideální součástky a poté reálné součástky s tolerancí 1 %, jejichž hodnoty jsou uvedeny ve schématu na obrázku 2.36. Prozatím nebyly uvažovány jejich parazitní vlastnosti.



Obrázek 2.36 První (1) a druhé (2) možné zapojení LC filtru typu pásmová zadrž 5. řádu pro FM pásmo při použití eliptické aproximace [9].



Obrázek 2.37 Graf průběhu přenosu a PSV pásmové zadrž FM pásma v závislosti na kmitočtu pro eliptickou aproximaci.

V případě Chebyshevovy i eliptické aproximace jsou splněny požadavky na průchozí útlum v celém propustném pásmu až do 1000 MHz. PSV přesahuje limitní hodnotu 1,8

pouze v těsné blízkosti mezních kmitočtů u Chebyshevovy aproximace, jinak je v celém propustném pásmu až do 1000 MHz požadavek na maximální *PSV* splněn, a to i pro eliptickou aproximaci. Pro přehlednost byl graf omezen pouze na blízké okolí zádržného pásma.

Z těchto návrhů vyplývá, že pro pásmovou zádrž VKV-FM bude dostačující Chebyshevova aproximace, kdy zadaným požadavkům nejlépe odpovídá druhé zapojení. Návrh filtru a měření vybraných parametrů je uveden v kapitole 3.2.3 Pásmová zádrž pro pásmo VKV-FM.

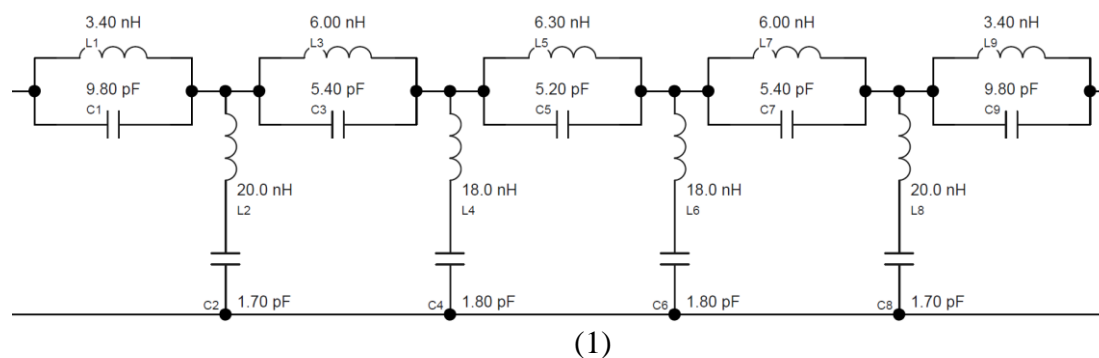
2.3.4 Pásmová zádrž pro pásmo LTE 800 a GSM 900

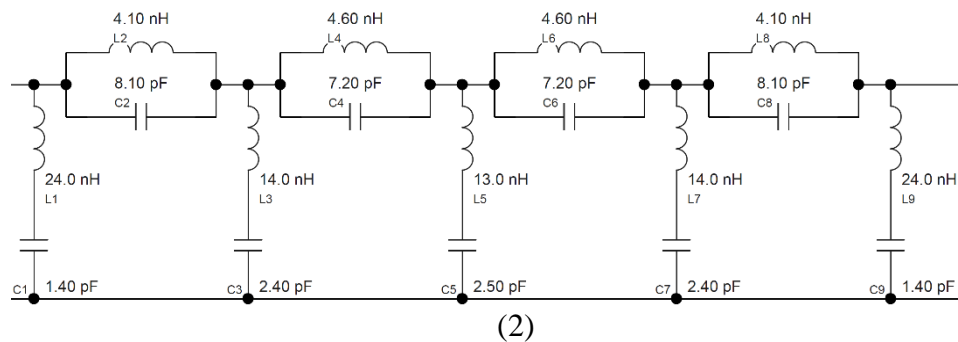
Požadavky na průchozí útlum a poměr stojatých vln v závislosti na kmitočtu jsou uvedeny v tabulce 2.17.

Tabulka 2.17 Parametry filtru typu pásmová zádrž pro LTE 800 a GSM 900.

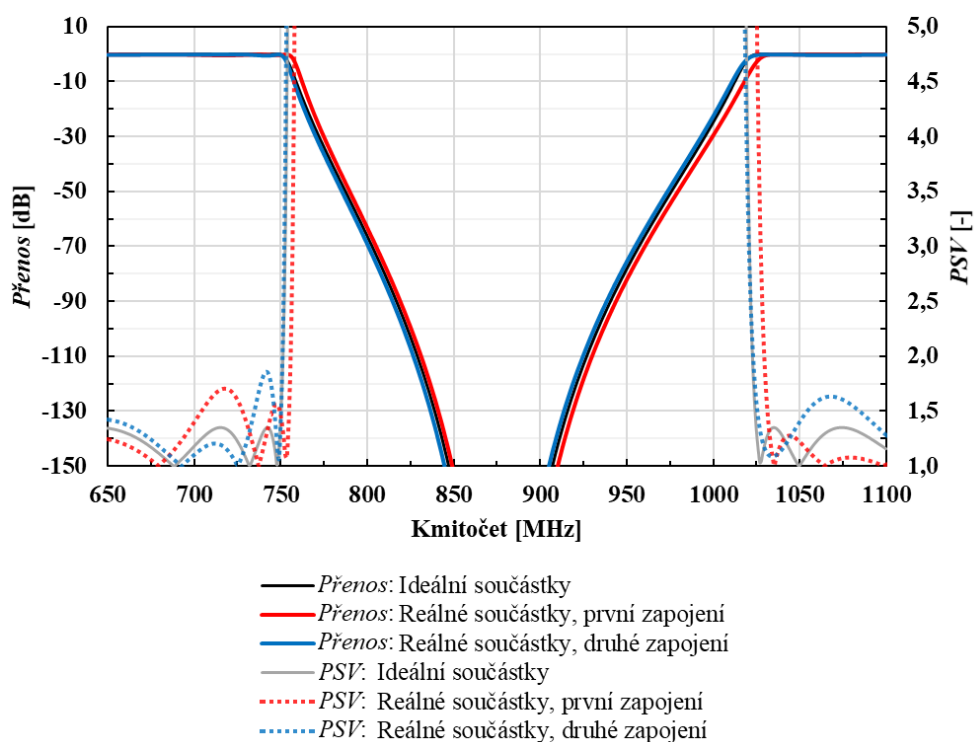
Kmitočet/pásmo [MHz]	Průchozí útlum [dB]	<i>PSV</i> [-]
0 – 750	<3	<1,8
1025 – 2000	<3	<1,8
791	>20	-
960	>20	-
805 – 950	>40	-

Návrh filtru probíhal v nástroji Nuhertz Filter Solutions [9]. Výsledek při použití Chebyshevovy aproximace je vidět na obrázku 2.38 a 2.39. Pro dosažení dostatečné strmosti byl zvolen devátý řád filtru. Při výpočtu byly nejprve zvoleny ideální součástky a poté reálné součástky s tolerancí 1 %, jejichž hodnoty jsou uvedeny ve schématu na obrázku 2.38. Prozatím nebyly uvažovány jejich parazitní vlastnosti.



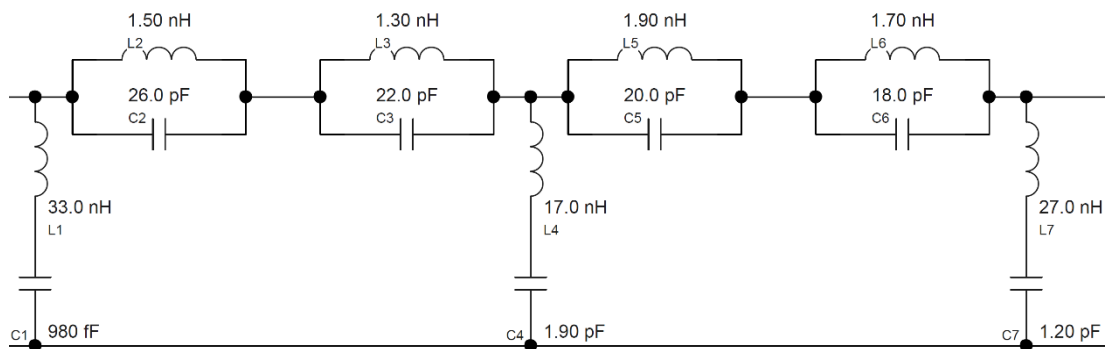


Obrázek 2.38 První (1) a druhé (2) možné zapojení LC filtru typu pásmová zadrž 9. řádu pro LTE 800 a GSM 900 pásmo při použití Chebyshevovy aproximace [9].

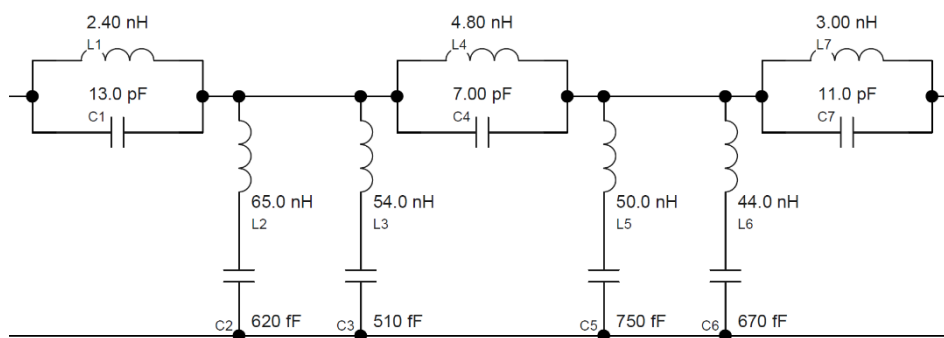


Obrázek 2.39 Graf průběhu přenosu a PSV pásmové zadržky LTE 800 a GSM 900 pásma v závislosti na kmitočtu pro Chebyshevovu aproximaci.

Výsledek při použití eliptické aproximace je vidět na obrázku 2.40 a 2.41. Pro dosažení požadované strmosti postačuje pátý řád filtru. Při výpočtu byly nejprve zvoleny ideální součástky a poté reálné součástky s tolerancí 1 %, jejichž hodnoty jsou uvedeny ve schématu na obrázku 2.40. Prozatím nebyly uvažovány jejich parazitní vlastnosti.

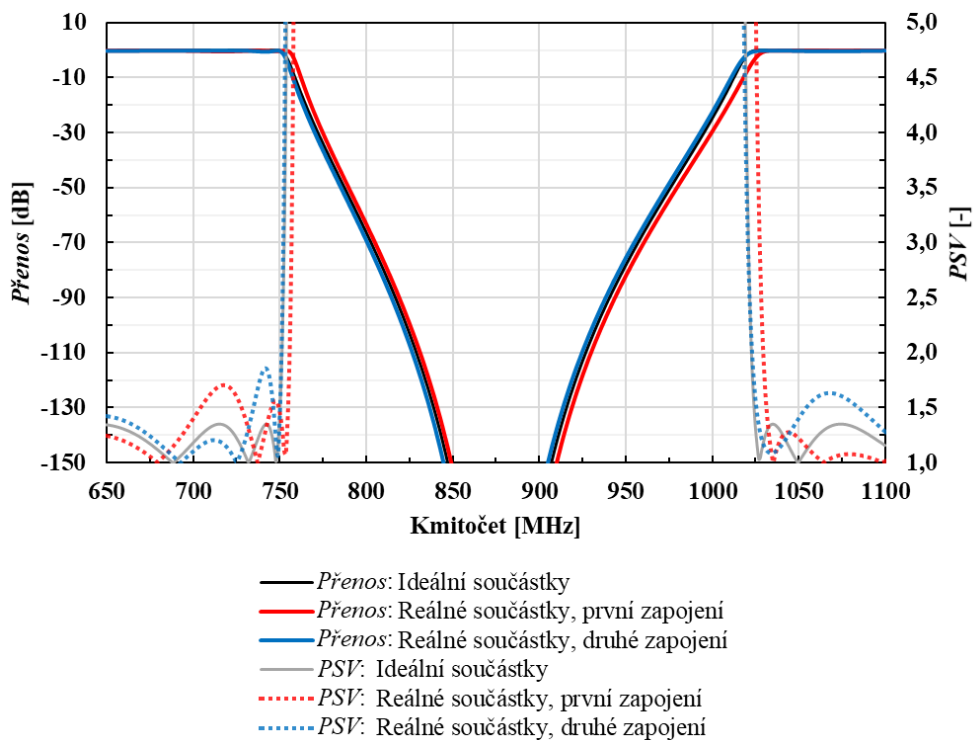


(1)



(2)

Obrázek 2.40 Zapojení LC filtru typu pásmová zádrž 5. řádu pro LTE 800 a GSM 900 pásmo při použití eliptické aproximace [9].



Obrázek 2.41 Graf průběhu přenosu a PSV pásmové zádrže LTE 800 a GSM 900 pásma v závislosti na kmitočtu pro eliptickou aproximaci.

V případě Chebyshevovy i eliptické aproximace jsou splněny požadavky na průchozí útlum v celém propustném pásmu až do 2000 MHz. *PSV* přesahuje limitní hodnotu 1,8 pouze v těsné blízkosti mezních kmitočtů u Chebyshevovy aproximace, jinak je v celém propustném pásmu až do 2000 MHz požadavek na maximální *PSV* splněn, a to i pro eliptickou aproximaci. Pro přehlednost byl graf omezen pouze na blízké okolí zádržného pásma.

Z těchto návrhů vyplývá, že pro pásmovou zádrž LTE 800 a GSM 900 bude dostačující Chebyshevova aproximace, kdy zadaným požadavkům odpovídá druhé zapojení. Návrh filtru a měření vybraných parametrů je uveden v kapitole 3.2.4 Pásmová zádrž pro pásmo LTE 800 a GSM 900.

2.4 Zesilovač a atenuátor

Poslední část slouží k úpravě úrovně signálu, který pak vstupuje do spektrálního analyzátoru. Tato část se skládá ze zesilovače, atenuátoru, přímého propojení a ještě jedné volné cesty pro možné budoucí využití. Výběr jednotlivých zařízení probíhá pomocí koaxiálních přepínačů č. 4 a 5.

2.4.1 Zesilovač

Zesilovač bude s pevně definovanou hodnotou zisku, který je požadován minimálně 15 dB a zároveň by neměl být větší jak 25 dB, aby nedošlo k přebuzení SA. Protože v prvním subpásmu bude použita aktivní anténa, tak úroveň signálu bude dostatečně velká a nebude třeba ji zesilovat. Kmitočtové pásmo, v jakém bude zesilovač pracovat, je přibližně 20 MHz až 6 GHz.

Zesilovač by měl být typu LNA – nízkošumový. To, jak zesilovač přispívá k celkovému výstupnímu výkonu šumu, je charakterizováno jeho šumovým číslem F v dB (někdy se může uvádět pouze jako poměr SNR na vstupu ku SNR na výstupu). Protože zesilovač bude pracovat se vstupním signálem o malé úrovni (maximálně do 0 dBm), je potřeba, aby šumové číslo bylo co nejmenší, maximálně 3 až 4 dB.

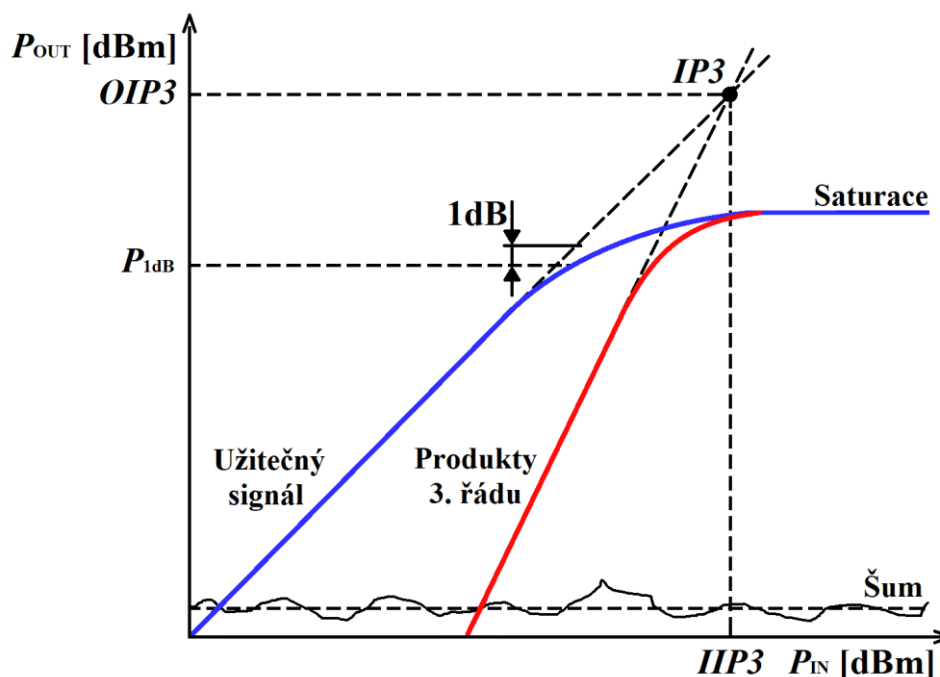
Dalším parametrem je bod zahrazení pro intermodulační produkty 3. řádu (3rd Order Intercept Point – IP3). Tento bod je určen dvěma hodnotami, a to pro vstup a výstup ($IIP3$ – Input 3rd Order Intercept Point, $OIP3$ – Output 3rd Order Intercept Point). Výrobci zesilovačů většinou udávají $OIP3$, ten by měl být minimálně 20 dBm.

Hranici linearity zesilovače určuje bod jednodediciblové komprese P_{1dB} , ten je definován jako výstupní výkon, při kterém nastává pokles zisku zesilovače o 1 dB. Při dalším zvyšování vstupního výkonu zisk dále klesá, až dojde k saturaci aktivního prvku. U malosignálových LNA bývá bod jednodediciblové komprese v rozmezí 10 dBm až 20 dBm. Na obrázku 2.42 je vidět grafické znázornění $OIP3$ a P_{1dB} .

Dalšími parametry jsou zvlnění zisku v závislost na kmitočtu (Gain Flatness), které by mělo být co nejmenší, poměr stojatých vln na vstupu a výstupu a s tím související charakteristická impedance, která bývá většinou 50 Ω , dále maximální úroveň vstupního signálu a napájecí napětí a proud, kdy je preferováno napětí 12 V (5 V).

V tabulce 2.18 je uvedeno několik vhodných zesilovačů od několika výrobců spolu se základními parametry. Byly vybrány zesilovače ve formě modulu, které jsou opatřeny

SMA konektory pro připojení vstupního a výstupního signálu a dále pak pájecími piny pro připojení napájení. Na obrázku 2.43 je vidět typické provedení zesilovače ve formě modulu.



Obrázek 2.42 Bod zahrazení pro intermodulační produkty 3. řádu a bod jednodecibellové komprese [11].

Tabulka 2.18 Parametry zesilovačů ve formě modulu.

	Mini-Circuits ZX60-V63+	Mini-Circuits ZX60-6013E+
Kmitočtový rozsah	50 MHz – 6 GHz	20 MHz – 6 GHz
Zisk	21,9 dB @ 50 MHz 15,4 dB @ 6 GHz	16,2 dB @ 100 MHz 12,1 dB @ 6 GHz
Šumové číslo	3,3 dB @ 50 MHz 4,6 dB @ 6 GHz	3,3 dB
Výstupní bod jednodecibellové komprese	16,1 dBm	13,5 dBm @ 20 MHz 5,8 dBm @ 6 GHz
Výstupní bod zahrazení pro intermodulační produkty 3. řádu	28,8 dB	28,7 dB
Maximální úroveň vstupního signálu	13 dBm	15 dBm
Napájení	5 V (69 mA)	12 V (39 mA)
Poznámky	-	Nižší zisk oproti požadavku 15 dB.

	AmpliTech APT3-00100600-1310-D4	Pasternack PE15A3254
Kmitočtový rozsah	100 MHz – 6 GHz	30 MHz – 20 GHz
Zisk	28 dB	15 dB
Šumové číslo	1,3 dB	3 dB
Výstupní bod jednodécibellové komprese	10 dBm	20 dBm
Výstupní bod zahrazení pro intermodulační produkty 3. řádu	-	31,4 @ 5 GHz
Maximální úroveň vstupního signálu	-	10 dBm
Napájení	15 V (125 mA)	12 V až 15 V (180 mA)
Poznámky	Vyšší dolní kmitočet pásma oproti požadavku přibližně 20 MHz.	Vysoká hodnota horního kmitočtu pásma (20 GHz), oproti 6 GHz a z toho vyplývající vyšší cena.



Obrázek 2.43 Širokopásmový zesilovač Mini-Circuits ZX60-V63+ [12].

2.4.2 Atenuátor (útlumový článek)

Atenuátor bude sloužit ke snížení úrovně vstupního signálu, přičemž hodnotu útlumu bude možné nastavit po jednotlivých krocích. Požadavek na maximální útlum je 30 dB, v celém kmitočtovém pásmu 9 kHz – 6 GHz.

Atenuátory (útlumové články) jsou dostupné s pevnou hodnotou útlumu nebo s proměnnou hodnotou, kdy lze útlum nastavovat po definovaných krocích anebo lineárně v celém rozsahu.

U atenuátorů s proměnnou hodnotou útlumu dochází k přepínání dílčích vnitřních článků s konkrétní hodnotou útlumu. Vhodnou kombinací těchto dílčích článků je pak dosaženo celého rozsahu s určitým krokem. Podle typu přepínání dílčích útlumových článků můžeme atenuátory rozdělit na mechanicky přepínané, přepínané pomocí polovodičových prvků (PIN, GaAs diody) nazývané také solid-state nebo ve formě MMIC, kde se využívají opět polovodičové prvky.

Podle provedení můžeme rozdělit atenuátory do dvou skupin, a to ve formě modulu nebo ve formě integrovaného obvodu. Pro porovnání budou dále uvedeny atenuátory z každé skupiny vhodné pro toto použití.

Atenuátor ve formě modulu je opatřen dvěma konektory, jedním pro vstupní signál

a druhým pro výstupní signál. Pro tento případ jsou preferovány SMA konektory a pro připojení ovládání a napájení pájecí piny nebo konektorová lišta.

V případě atenuátoru ve formě integrovaného obvodu lze využít vývojovou desku od výrobce nebo IO osadit do zařízení vlastního návrhu.

Atenuátor může být ovládán napětově, kdy útlum závisí na hodnotě řídicího napětí (**voltage variable attenuator**). Tato varianta vyžaduje externí zdroj řídicího napětí, většinou symetrického. Další možností je aktivace určitého článku nebo i více článků současně přivedením napájecího napětí, pokud je článek bez napětí, je odpojen (**fail-safe**). Poslední možností je digitální ovládání, kdy je útlum určen n-bitovým slovem (**programmable attenuator, digital controlled attenuator**). Počet bitů pro ovládání je určen rozsahem a krokem atenuátoru. Řídicí rozhraní může být TTL nebo CMOS, paralelní nebo sériové.

Pro tento případ je zvolen typ s proměnnou hodnotou útlumu, nastavovanou s určitým krokem a digitálním ovládáním (TTL, paralelní).

Klíčovými parametry při výběru atenuátoru jsou: kmitočtový rozsah, maximální útlum, dále pak krok, s jakým je možno nastavovat výsledný útlum a přesnost, s jakou je výsledný útlum nastaven. Kromě požadovaného útlumu se uplatňuje ještě vložený útlum, který závisí na kmitočtu. Dalšími parametry jsou: poměr stojatých vln (charakteristická impedance bývá většinou 50 Ω), životnost (počet přepínacích cyklů), doba potřebná pro přepnutí a napájecí napětí (proud).

Atenuátor ve formě modulu:

Výběr atenuátoru se řídil podle požadované šířky pásma, maximálního útlumu a kroku. Napájecí napětí bude požadováno 3,3 V, 5 V, 12 V nebo 24 V. V tabulce 2.19 jsou uvedeny parametry vybraných atenuátorů ve formě modulu od několika výrobců. Provedení takového atenuátoru je vidět na obrázku 2.44.

Tabulka 2.19 Parametry vybraných atenuátorů ve formě modulu.

	API Weinschel		Analog Devices	
	3404-55	3406-55	HMC-C025	HMC-C018
Kmitočtový rozsah	DC – 6 GHz		DC – 13 GHz	
Maximální útlum	55 dB		31,5 dB	
Krok	5 dB	1 dB	0,5 dB	
Napájení	12 V (9 V až 13 V)		-5 V (5 mA)	
	68 mA	102 mA		
Ovládání	Napájecím napětím pro jednotlivé články, TTL driver, CMOS driver		Ovládání každého článku zvlášť napětěovou úrovní high/low – CMOS (6 článků)	Sériové rozhraní, 6-ti bitové slovo – CMOS



Obrázek 2.44 Atenuátor API Weinschel model 3404 ve formě modulu [13].

Atenuátor ve formě integrovaného obvodu:

Pro atenuátor ve formě integrovaného obvodu platí stejné požadavky jako pro provedení ve formě modulu. V tabulce 2.20 jsou uvedeny parametry vybraných atenuátorů ve formě IO od několika výrobců. Provedení takového atenuátoru osazeného na vývojové desce poskytované výrobcem je vidět na obrázku 2.45.

Tabulka 2.20 Parametry vybraných atenuátorů ve formě integrovaného obvodu.

	Analog Devices		
	HMC424ALH5	HMC424ALP3E	HMC624A
Kmitočtový rozsah	DC – 13 GHz		100 MHz – 6 GHz
Maximální útlum	31,5 dB		
Krok	0,5 dB		
Napájení	-5 V (2,3 mA)		3 V až 5 V (65 µA)
Ovládání	Ovládání každého článku zvlášť napětíovou úrovní high/low (6 článků)		Paralelní nebo sériové rozhraní, CMOS/TTL
Vývojová deska	EV1HMC424ALH5	EV1HMC424ALP3	Evaluation board HMC624A
Pouzdro	SMT Package, 25 mm ²	Leadless SMT Plastic Package, 9 mm ²	LFCS (4 × 4 mm, 24 pin)
Ostatní	GaAs MMIC, vysoká spolehlivost	-	-
	Peregrine Semiconductor		
	PE43711	PE43712	PE43713
Kmitočtový rozsah	9 kHz – 6 GHz		
Maximální útlum	31,75 dB		
Krok	0,25 dB do 4 GHz; 0,5 dB do 5 GHz a 1 dB do 6 GHz		

Napájení	2,3 V až 5,5 V (150 μ A)		Normal mode a Bypass mode ³⁾
Ovládání	Paralelní ¹⁾ nebo sériové rozhraní, CMOS	Paralelní ¹⁾ nebo sériové adresovatelné ²⁾ rozhraní, CMOS	Paralelní ¹⁾ nebo sériové adresovatelné ²⁾ rozhraní, CMOS
Vývojová deska	PE43711 EVB s možností ovládání přes USB	PE43712 EVB s možností ovládání přes USB	PE43713 EVB s možností ovládání přes USB
Pouzdro	QFN (4 \times 4 mm, 24 pin)	QFN (5 \times 5 mm, 32 pin)	

¹⁾ Dvě možnosti paralelního programování (ovládání): **Latched** – pulzem přivedeným na pin LE (Latch Enable) je nastaven útlum, který byl vybrán 6-ti bity DI [6:0] (Parallel Control Bit), **Direct** – na pinu LE je trvale úroveň high a útlum je nastaven přímo volbou vhodné úrovně na DI [6:0].

²⁾ Sériové adresovatelné programování: 16-ti bitové slovo, kdy prvních 8 bitů definuje útlum a dalších 8 bitů definuje adresu, která je porovnávána (první tři bity) s hodnotou na vstupech A0 až A3. Pokud se bity shodují, je nastaven požadovaný útlum.

³⁾ Normal mode: je použit interní generátor záporného napětí ($V_{SS_EXT} = 0$ V), napájecí napětí V_{DD} může být v rozsahu 2,3 V až 5,5 V (150 mA). Bypass mode: zlepšuje potlačení nežádoucích signálů, je použit externí zdroj záporného napětí V_{SS_EXT} v rozsahu -3,6 V až -2,4 V (-16 μ A). Kladné napájecí napětí může být v rozsahu 2,7 V až 5,5 V (50 μ A).



Obrázek 2.45 Atenuátor Analog Devices ve formě integrovaného obvodu osazený na vývojové desce [7].

2.5 Rotátor

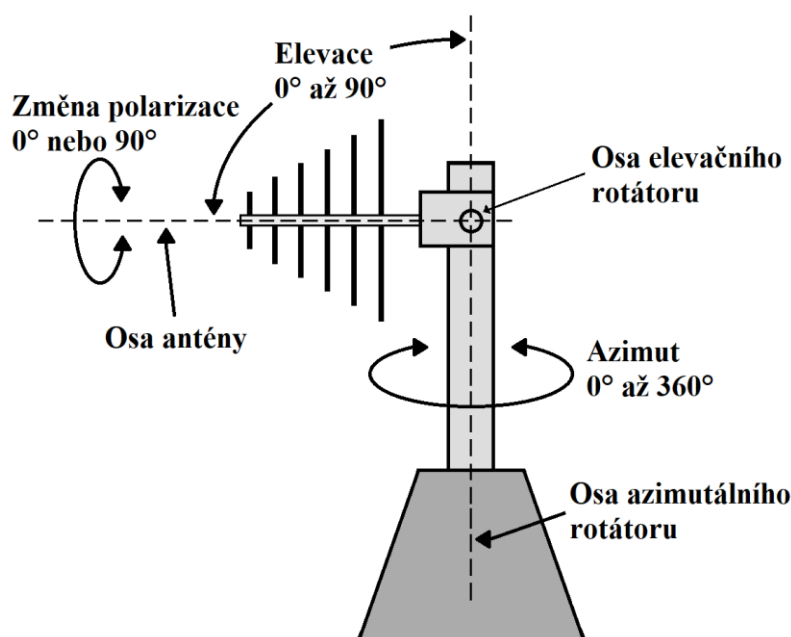
Anténní rotátor je zařízení, které se používá v kombinaci se směrovými anténami a slouží k zaměření hlavního směru příjmu antény na zdroj signálu pro dosažení maximálního příjmu. V případě monitorovací stanice slouží k identifikaci místa zdroje rušení. Rotátor může být azimutální, elevační, polarizační nebo jejich kombinace.

Azimutální rotátor je umístěn na stožáru a k rotátoru je upevněna anténa nebo i více antén. Rotátor otáčí anténami kolem své osy v rozsahu 0° až 360° (některé typy i 0° až 450°, tzn. 1 a 1/4 otáčky). Otáčení může být prováděno s určitým krokem nebo může být rovnou nastavena hodnota azimutu.

Elevační rotátor bývá většinou používán v kombinaci s azimutálním a slouží pro nastavení úhlu odklonu hlavního směru příjmu antény od roviny zemského povrchu směrem do oblohy. Rotátor provádí tento odklon v rozsahu 0° až 90° . Tento typ rotátoru se většinou používá pro satelitní příjem a při monitorování nemá využití.

Polarizační rotátor slouží ke změně lineární polarizace. Otočením k němu upevněné antény kolem její osy o 90° zajišťuje změnu horizontální a vertikální polarizace.

Na následujícím obrázku 2.46 je ve zjednodušené formě znázorněna funkce azimutálního, elevačního a polarizačního rotátoru při použití logaritmicko-periodické antény.



Obrázek 2.46 Azimutální rotátor v kombinaci s elevačním a polarizačním rotátorem.

Rotátor bude u přenosné monitorovací stanice uplatněn převážně při používání pro dlouhodobé monitorování spektra, viz začátek kapitoly 2 Systémový návrh zařízení, nebo při zaměřování. V tomto případě bude potřeba pouze azimutální rotátor, popřípadě polarizační rotátor. Rotátor bude možné ovládat prostřednictvím PC. Součástí monitorovacího softwaru bude grafické uživatelské rozhraní pro ovládání rotátoru.

Vhodnými azimutálními rotátory pro tento případ jsou YAESU G-800, G-1000 nebo G-2800. Uvedené typy mohou být ve verzi DXA, DXC, SDX, SA a S, ty se liší pouze možnostmi přednastavení azimutu, regulací rychlosti otáčení, napětím DC motoru a dodávaným příslušenstvím. Tyto typy umožňují v kombinaci s jednotkou YAESU GS-232A připojení k PC a ovládání přes sériovou linku. Pro ovládání přes PC lze také použít univerzální ovládací jednotku, viz kapitola 2.5.2 Ovládání přes PC. Rotátory YAESU byly vybrány, protože jsou používány Českým telekomunikačním úřadem. Rotátor je možné také ovládat přímo prostřednictvím manuální ovládací jednotky, ta je spolu s typem G-1000 DXA vidět na obrázku 2.48 vlevo.

Konkrétní typ rotátoru bude vybrán až podle toho, jaké antény (uvedené v kapitole 2.1 Rozdělení do kmitočtových subpásů a výběr antén) budou použity. Výběr rotátoru

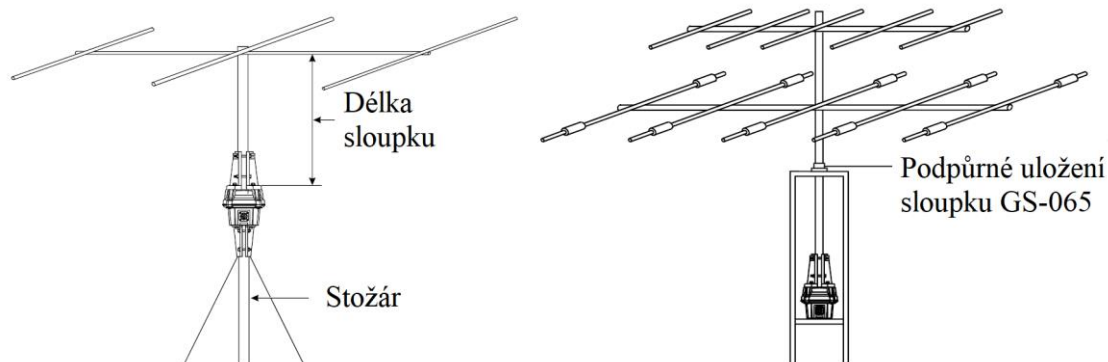
se bude řídit podle doporučení výrobce, která jsou shrnuta v kapitole 2.5.1 Instalace rotátoru. Základní parametry rotátorů YAESU jsou uvedeny v následující tabulce 2.21.

Tabulka 2.21 Parametry rotátorů YAESU.

		G-800	G-1000	G-2800
Maximální plocha vystavená větrné zátěži		2 m ²	2,2 m ²	3 m ²
Konstanta K		maximálně 180	maximálně 230	maximálně 950
Maximální vertikální zatížení		200 kg	200 kg	300 kg
Rozsah otáčení		450°±3°	450°±3°	450°±3°
Čas pro otočení o 360°		40 až 100 s	40 až 100 s	50 až 120 s
Napájení		220 VAC, 50 Hz, 0,5 A	220 VAC, 50 Hz, 0,5 A	220 VAC, 50 Hz, 0,7 A
Hmotnost	Rotátor	3,6 kg	3,6 kg	6,5 kg
	Manuální ovládací jednotka	2,8 kg	2,8 kg	3,8 kg

2.5.1 Instalace rotátoru

Dle doporučení výrobce rozlišujeme dvě možnosti instalace (umístění) rotátoru. První možností je umístění přímo na vrchol stožáru, viz obrázek 2.47 vlevo. Druhou možností je instalace s podpůrnou konstrukcí neboli instalace do věže, jak tuto konfiguraci nazývá výrobce, viz obrázek 2.47 vpravo.



Obrázek 2.47 Možnosti instalace rotátoru YAESU [14].

V případě instalace na vrchol stožáru dochází k většímu namáhání svorky, ve které je upevněn sloupek s anténami (viz obrázek 2.47 vlevo) vlivem větru. Proto v této konfiguraci platí větší omezení pro celkovou plochu antény (antén), na kterou působí vítr a také pro maximální délku sloupku, na kterém je anténa (antény) upevněna. Pro zjištění, zdali je možné využít tuto konfiguraci, lze použít výpočetní vzorec udávaný výrobcem [14]

$$(\text{plocha antény, na kterou působí vítr}) \times (\text{délka sloupku}) < 0,45, \quad (2.4)$$

kde *plocha antény* je zadávána v m², *délka sloupku* v m a konstanta na pravé straně platí pro typ G-800 a G-1000 (pro G-2800 je konstanta rovna 0,8). Výrobce doporučuje uvažovat pouze 40 % z mezních parametrů, a to z důvodu možnosti zhoršení povětrnostních podmínek, takže konstanta na pravé straně rovnice bude po této korekci rovna 0,27.

Ve druhém případě, a to při instalaci s podpůrnou konstrukcí jsou omezení pro použití antén nižší oproti instalaci na stožár, a to z důvodu použití podpůrného uložení (viz obrázek 2.47 vpravo). Možnost použití anténního systému v kombinaci s rotátorem je možné ověřit výpočtem konstanty K jako [14]

$$K = (\text{rádius, který anténa opisuje při otáčení}) \times (\text{hmotnost antény}), \quad (2.5)$$

kde *rádius, který anténa opisuje při otáčení* je zadáván v m. *Hmotnost antény* je součet hmotností antény, sloupku, příslušenství pro montáž a je zadávána v kg. Maximální hodnota konstanty K je pro jednotlivé typy uvedena v tabulce 2.21. V případě použití více antén je výsledná konstanta K součtem dílčích konstant vypočtených pro každou anténu zvlášť. Dalším omezujícím parametrem je plocha antény, na kterou působí vítr, viz tabulka 2.21.

U obou možností instalace nesmí překročit hmotnost antén s příslušenstvím maximální dovolené vertikální zatížení rotátoru.

2.5.2 Ovládání přes PC

Rotátory YAESU je možné ovládat přes PC v kombinaci s jednotkou YAESU GS-232A. Ta komunikuje s PC přes sériovou linku souborem příkazů sloužících k ovládání a kalibraci. Tyto příkazy lze implementovat do vlastního softwaru navrženého k ovládání rotátoru.

Druhou možností je použití univerzální ovládací jednotky rotátoru EA4TX ARS-USB (Antenna Rotator System). Výhodou této jednotky je její univerzálnost, kdy lze ovládat širokou škálu rotátorů. Lze jí plně využít jako náhradu GS-232A, protože využívá stejné příkazy na ovládání a kalibraci. Navíc díky displeji a tlačítkům na čelním panelu nahrazuje i manuální ovládací jednotku (viz obrázek 2.48) oproti GS-232A, která musí být použita v kombinaci s manuální ovládací jednotkou.

Ovládání rotátoru pomocí jednotky ARS-USB z PC je možné pomocí definovaných příkazů zadávaných do terminálu, viz příloha B.6 Seznam příkazů pro ovládání rotátoru. Další možností je použití výrobcem dodávaného softwaru s jednoduchým grafickým uživatelským rozhraním ARSVCOM a ARSCONF (konfigurace a kalibrace) [15] nebo vytvoření vlastního softwaru pro obsluhu jednotky, což bude v tomto případě využito. Součástí softwaru pro monitorování spektra bude i grafické uživatelské rozhraní pro ovládání rotátoru, ve kterém budou implementovány stejné funkce jako na jednotce pro manuální ovládání:

- Manuální ovládání otáčení dvěma směry (LEFT – proti směru hodinových ručiček a RIGHT – po směru hodinových ručiček).
- Volba konkrétní hodnoty azimutu s možností nastavení výchozí hodnoty a možnost uložení a použití několika přednastavených hodnot.

- Indikace aktuální hodnoty azimutu (hodnota + grafické zobrazení).
- Nastavení rychlosti otáčení (záleží na konkrétním typu rotátoru).
- Možnost kalibrace rotátoru.

Vlastní ovládání rotátoru zajišťuje pět relátek, které určují směr otáčení. V případě nahrazení manuální ovládací jednotky je třeba zajistit napájení pro motor rotátoru. Napájení bude poskytovat jedna větev SS zdroje, viz kapitola 2.7 Napájení. Podrobné údaje o ovládací jednotce jsou uvedeny v následující tabulce 2.22.

Tabulka 2.22 Parametry jednotky EA4TX ARS-USB.

Mikrokontrolér	PIC18F4550-I/P – 8 bit
A/D převodník	10 bit – rozlišení 0,35° @ 10 bit Rozsah vstupních napětí od ± 3 V do ± 24 V
Spínání rotátoru	5 \times relé 5 A @ 220 V – 2 \times azimut, 2 \times elevace, 1 \times pomocné (brzda)
Propojení s PC	Detekce jako sériový port, podpora USB 2.0
Napájení	12 – 14 VDC, 160 – 250 mA
Rozměry	120 \times 120 \times 35 mm



Obrázek 2.48 Rotátor YAESU G-1000 DXA s manuální ovládací jednotkou vlevo [16] a ARS-USB jednotka vpravo [15].

2.6 Ovládání VF jednotky

Monitorovací stanici umístěnou po delší dobu na konkrétním místě bude třeba ovládat, a to především její vysokofrekvenční část a rotátor. Komunikace s monitorovací stanicí bude probíhat prostřednictvím připojení přes vzdálenou plochu k PC, ten je její součástí a je vybaven LTE modemem, více v kapitole 3.8 Měření, zpracování a zobrazení naměřených dat.

Toto zajistí ovládací jednotka, která bude ovládat koaxiální přepínače, atenuátor, zesilovač a případně i další komponenty. Ovládací jednotka bude propojena s PC přes USB rozhraní a ovládání bude zajišťovat sada příkazů. Tyto příkazy lze zadávat do

terminálu nebo využít monitorovací software, jehož součástí bude i grafické uživatelské rozhraní pro ovládání VF části a rotátoru, viz kapitola 3.8.3 Monitorovací software.

Ovládání konkrétních komponent bude zajišťovat mikrokontrolér, který bude zvolen na základě těchto klíčových požadavků: dostatečný počet I/O portů – minimálně 5 (20 I/O pinů), paměť flash minimálně 16 kB, SPI, USART, frekvence hodinového signálu 0 – 16 MHz (externí krystal), napájení 3,3 V a 5V a SMD pouzdro.

Těmto požadavkům vyhověl osmibitový mikrokontrolér od výrobce Atmel ATmega 165PA s parametry uvedenými v tabulce 2.23.

Dále bude ovládací jednotka obsahovat převodník USART (Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter) na USB, který umožňuje komunikaci mikrokontroléru s PC. Při použití tohoto převodníku se pak zařízení připojené přes USB jeví z hlediska PC jako další sériový port (virtuální). Převodník byl vybrán od výrobce FTDI (Future Technology Devices International) FT232RL. Parametry převodníku jsou vidět v následující tabulce 2.23.

Tabulka 2.23 Parametry mikrokontroléru ATmega 165PA a převodníku FT232RL.

ATmega 165PA	
Maximální kmitočet hodin	16 MHz
Velikost flash paměti	16 kB
Počet vstupů/výstupů	54
Napájecí napětí	1,8 V – 5,5 V
Rozsah provozních teplot	-40°C – +85°C
Pouzdro	SMD TQFP-64
FT232RL	
Integrované zatěžovací rezistory pro USB	
Integrovaný generátor hodinového signálu bez nutnosti použití externího krystalu ¹⁾	
Přenosová rychlost 300 Bd až 3 MBd	
Vyrovnávací paměť 128 B RX a 256 B TX	
USB ovladače	
Podpora USART pro 7 nebo 8 datových bitů, 1 nebo 2 stop bity a sudá/lichá/žádná parita	
Podpora TTL a CMOS logiky 5 V/3,3 V/2,8 V/1,8 V	
Integrovaný generátor napětí 3,3 V	
Rozsah provozních teplot -40°C – +85°C	
Napájecí napětí (3,3 V) 4,35 V – 5,25 V	

¹⁾ Pouze při volbě napájecího napětí 3,3 V je potřeba použít externí zdroj hodinového signálu – krystal.

Ovládání koaxiálních přepínačů:

Koaxiální přepínače budou uvažovány pouze ve verzi s TTL ovládáním (ovládání napětíovými úrovněmi 0 V/5 V). Pro každý VF výstup je vyveden jeden ovládací vstup. Přivedením vysoké úrovně je VF výstup propojen na vstup (COM port) a naopak. Všechny koaxiální přepínače budou typu “normally open”, což znamená, že bez napětí

na ovládacích vstupech je koaxiální přepínač ve výchozí pozici – výstupy odpojeny od vstupu. Přepínače č. 2 a 3 sloužící pro výběr filtru budou ovládány současně, stejně jako přepínače č. 4 a 5 sloužící pro výběr zesilovače nebo atenuátoru, viz blokové schéma na obrázku 2.49.

Pro případné použití koaxiálního přepínače ve formě integrovaného obvodu bude ovládací jednotka umožňovat změnu napájecího napětí mikrokontroléru z 5 V na 3,3 V, viz dále.

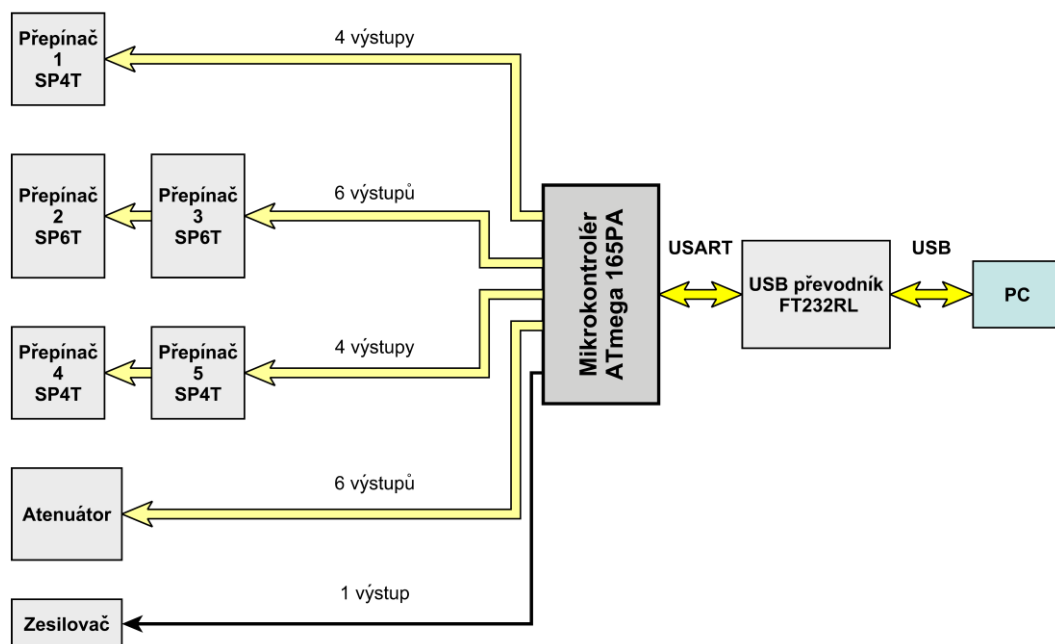
Ovládání atenuátoru:

Atenuátor bude ovládán podobně jako koaxiální přepínače. V případě atenuátoru s TTL ovládáním je pro každý dílčí článek vyveden ovládací vstup – vysoká úroveň aktivuje článek, nízká deaktivuje. Vhodnou kombinací je pak nastaven celkový útlum.

Ovládání zesilovače:

Zesilovač bude zapnut jen tehdy, pokud bude zvolen ve VF cestě, jinak bude vypnut, a to z důvodu jeho možného rozkmitání při použití koaxiálních přepínačů typu reflective, více v kapitole 3.3 Zesilovač.

Mikrokontrolér bude spínat zátěž (ovládací vstupy všech komponent) pomocí logické 1, to znamená spínání proti zemi (označení SOURCE).



Obrázek 2.49 Blokové schéma ovládací jednotky.

Ovládací jednotka bude napájena ze zdroje stejnosměrného napětí. Převodník vyžaduje napájecí napětí 4 – 5,25 V, takže bude napájen vždy 5 V. Případ napájení 3,3 V nebude uvažován, protože by musel být připojen externí zdroj hodinového signálu. U mikrokontroléru bude možno vybrat napájecí napětí 5 V nebo 3,3 V pro případ použití komponentů s takovým ovládacím napětím. U převodníku poté musí být na vstup, který slouží k výběru 5 V nebo 3,3 V logiky přivedeno příslušné napětí.

Programování ovládací jednotky bude probíhat v jazyce C v AVR studiu a bude použit programátor BiProg (STK 500). Podrobný popis návrhu a nastavení komunikace je uveden v kapitole 3.5 Ovládání VF jednotky.

2.7 Napájení

Celá monitorovací stanice bude napájena ze sítě 230 V/50 Hz a pro napájení vysokofrekvenční jednotky bude navržen stejnosměrný napájecí zdroj. Napájení bude potřeba zajistit pro aktivní anténu (I. subpásmo), pro koaxiální přepínače, zesilovač, atenuátor, ovládací jednotky a anténní rotátor. Je brána v úvahu i rezerva například pro aktivní chlazení monitorovací stanice, osvětlení, popřípadě další komponenty. Ostatní zařízení budou napájena přímo ze sítě 230 V (vlastní napájecí zdroj).

Zdroj stejnosměrného napájecího napětí bude lineární, a to z důvodu omezení rušení VF jednotky. Skládat se bude ze síťového transformátoru s více sekundárními vinutími, následovat bude usměrňovací obvod, výstupní filtr a stabilizátor výstupního napětí. Blokové schéma zdroje stejnosměrného napětí je vidět na obrázku 2.50.

Dimenzování zdroje závisí na vybraných dílčích zařízeních a ještě rezervě pro další možné zařízení nebo náhradě za stávající.

Koaxiální přepínače:

Elektromechanické koaxiální přepínače budou uvažovány pouze s napájecím napětím 28 V a maximálním proudem 200 mA, viz kapitola 2.2 Koaxiální přepínače, kde jsou vybrány koaxiální přepínače, které by bylo možné použít.

Koaxiálních přepínačů bude celkem 5, takže výsledné parametry napájecí větve pro koaxiální přepínače jsou 28 V a 1000 mA.

V případě použití koaxiálních přepínačů ve formě integrovaného obvodu bude třeba zdroj dovybavit zdrojem symetrického napětí $\pm 3,3$ V, které vyžaduje většina elektronických koaxiálních přepínačů. Tento zdroj bude ve formě malého odnímatelného modulu. Odběr proudu je u těchto přepínačů řádově desítky μ A. Spolu s ovládací jednotkou, kde musí být mikrokontrolér napájen 3,3 V, bude maximální odběr proudu v řádu jednotek mA.

Atenuátor:

Atenuátor bude uvažován ve formě modulu nebo jako integrovaný obvod na vývojové desce, a to pouze s kladným napájecím napětím. Napájecí napětí bude 12 V (modul) nebo 5 V (integrovaný obvod, využití integrovaného generátoru záporného napětí). Odběr proudu se v závislosti na konkrétním typu pohybuje od desítek μ A do maximálně 150 mA, viz kapitola 2.4.2 Atenuátor (útlumový článek), kde jsou vybrány atenuátory, které by bylo možné použít.

Zesilovač:

Zesilovač bude použit ve formě modulu, a to s napájecím napětím 5 V nebo 12 V a proudem do 130 mA.

Ovládací jednotka:

Ovládací jednotka bude trvale napájena 5 V a v případě použití komponent vyžadujících ovládací napětí 3,3 V bude možné změnit napájecí napětí mikrokontroléru na 3,3 V. Proudový odběr ovládací jednotky bude maximálně do 100 mA.

Rotátor:

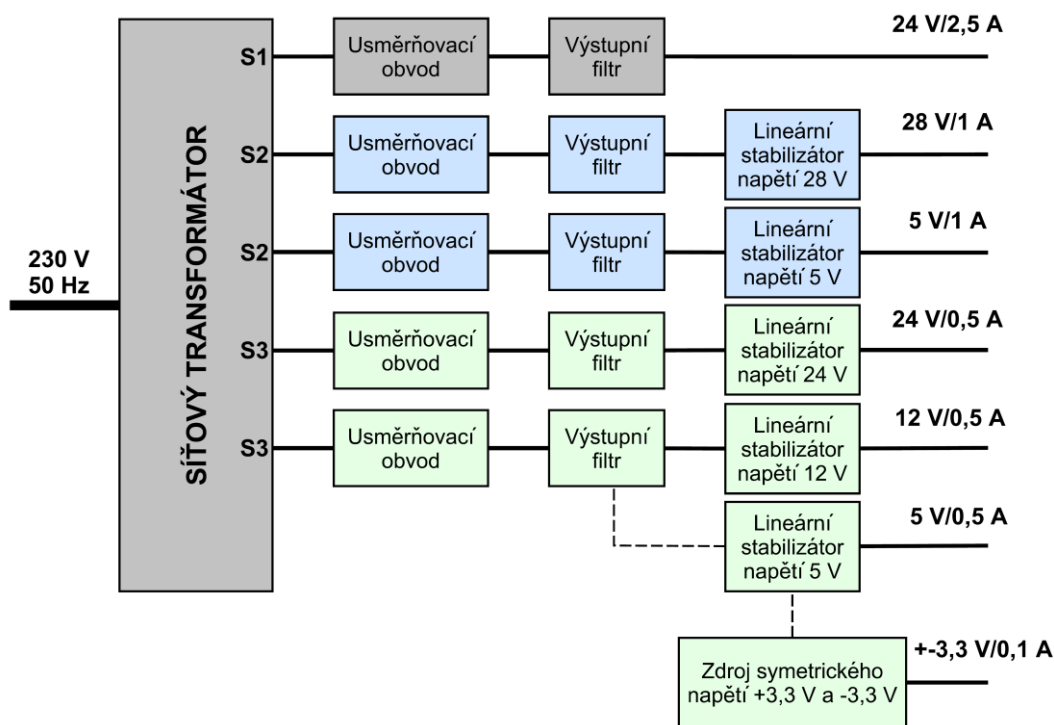
Ze tří vybraných typů rotátoru bude výběr omezen pouze na dva, a to YAESU G-800 a G-1000, a to ve verzi DXC nebo DXA, které jsou aktuálně dostupné. Z důvodu použití univerzální ovládací jednotky ARS-USB, která nahrazuje manuální ovládací jednotku, jejíž součástí je i napájecí zdroj pro DC motor rotátoru, bude součástí zdroje i větev pro napájení motoru rotátoru. Napětí pro motor rotátoru je v rozmezí 11 – 24 V a proud při 24 V maximálně 2 A. Napětí napájecí větve pro rotátor bude zvoleno 24 V/2,5 A. V této větvi nebude použit lineární stabilizátor napětí, pro DC motor postačuje pouze usměrněný výstup po filtraci.

Napájecí napětí univerzální ovládací jednotky ARS-USB je 12 – 14 V a proud v rozmezí 160 – 250 mA (bez a s použitím LCD displeje).

Aktivní antény:

Aktivní antény se budou používat pro I. subpásmo (do stovek MHz) a nejčastěji vyžadují napájecí napětí v rozsahu 12 – 24 V a proud maximálně do 300 mA.

Parametry jednotlivých napájecích větví jsou vidět v tabulce 2.24. Návrh napájecího zdroje je popsán v kapitole 3.6 Napájení, kde jsou uvedeny i všechny jeho parametry.



Obrázek 2.50 Blokové schéma lineárního napájecího zdroje s barevně označenými bloky týkající se konkrétní napájecí větve.

Tabulka 2.24 Parametry jednotlivých napájecích větví.

Napětí [V]	Proud [A]
28	1
24	2,5
24	0,5
12	0,5
5	1
Přídavné napájecí zdroje (moduly)	
5	0,5
±3,3	0,1

3 REALIZACE A VÝBĚR KONKRÉTNÍCH ZAŘÍZENÍ

Veškerá dílčí zařízení budou umístěna ve skříni z hliníkového plechu vyrobené na míru, která splňuje požadované krytí IP, aby mohla být umístěna ve venkovních prostorech a odolala všem povětrnostním vlivům.

Celá monitorovací stanice je modulární systém, stejně tak jako i vysokofrekvenční jednotka.

3.1 Koaxiální přepínače

Nejprve bylo třeba rozhodnout, zdali se použijí koaxiální přepínače ve formě integrovaného obvodu na vývojové desce nebo elektromechanické koaxiální přepínače.

Koaxiálních přepínačů ve formě IO na vývojové desce jsou vhodné kvůli těmto parametrům:

- Malé rozměry a tudíž nízká hmotnost.
- Nízké napájecí napětí a velmi malý příkon.
- Nižší pořizovací náklady.

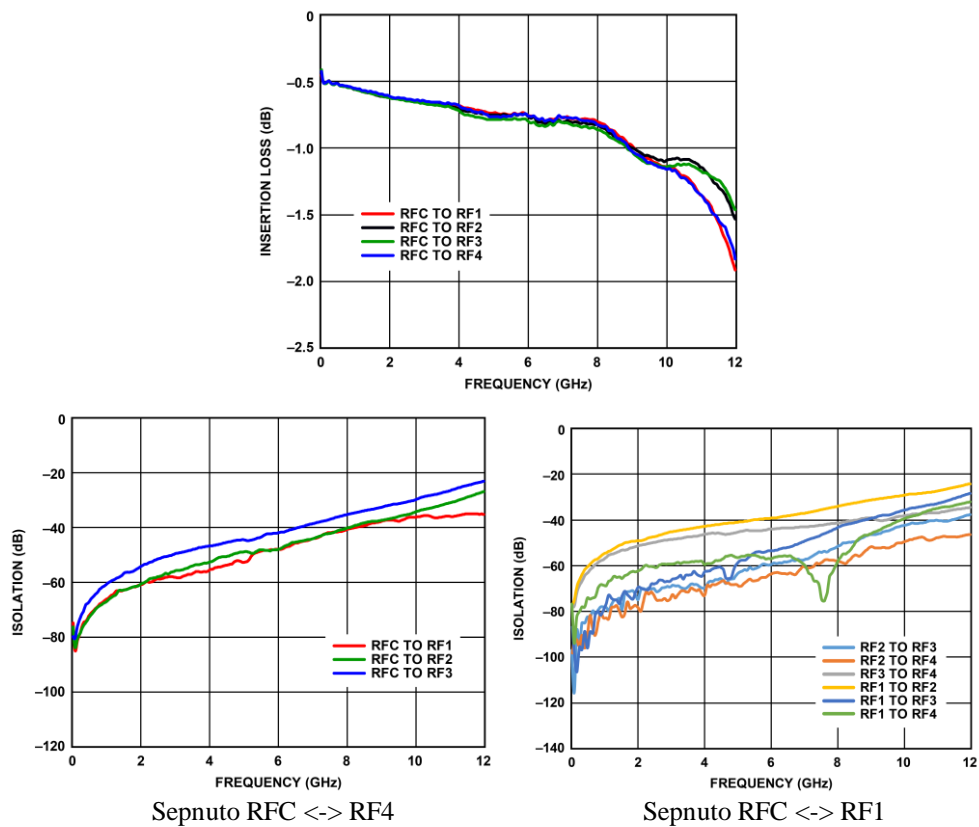
Nevýhody tohoto typu jsou:

- Vyšší hodnota vložného útlumu a nižší hodnota izolace oproti elektromechanickému typu.
- Symetrické napájení a ovládací napětí 3,3 V.

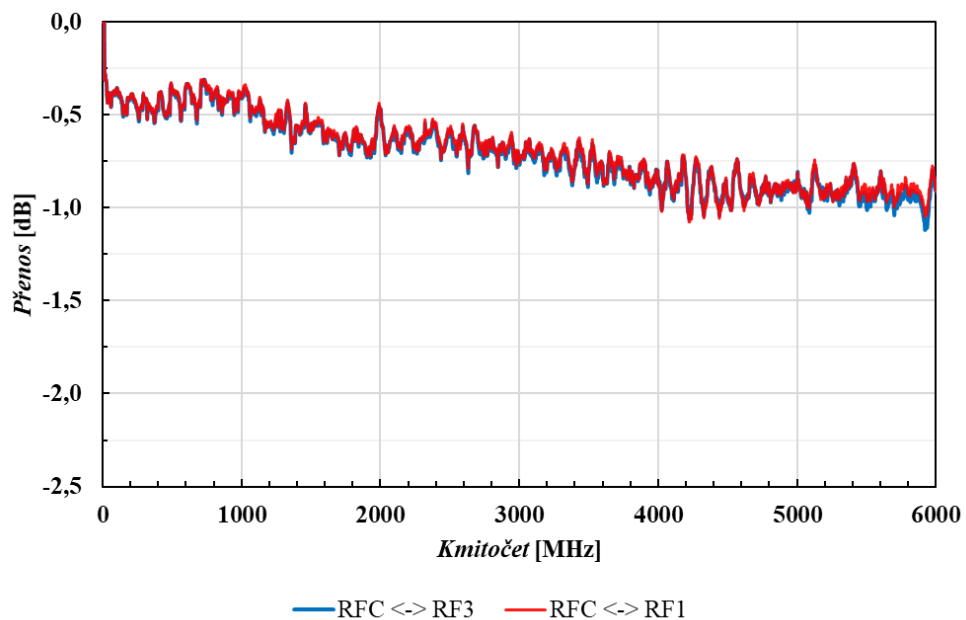
Stěžejním parametrem pro volbu koaxiálního přepínače byl vložný útlum, protože při celkovém počtu pěti přepínačů a nevhodné volbě může dojít k výraznému navýšení celkového vložného útlumu sepnuté cesty.

V kapitole 2.2 Koaxiální přepínače je uvedeno několik vybraných přepínačů elektromechanického typu i ve formě IO od různých výrobců, které vyhovují požadavkům taktéž uvedeným v této kapitole. Pro každý koaxiální přepínač jsou zde uvedeny jeho klíčové parametry.

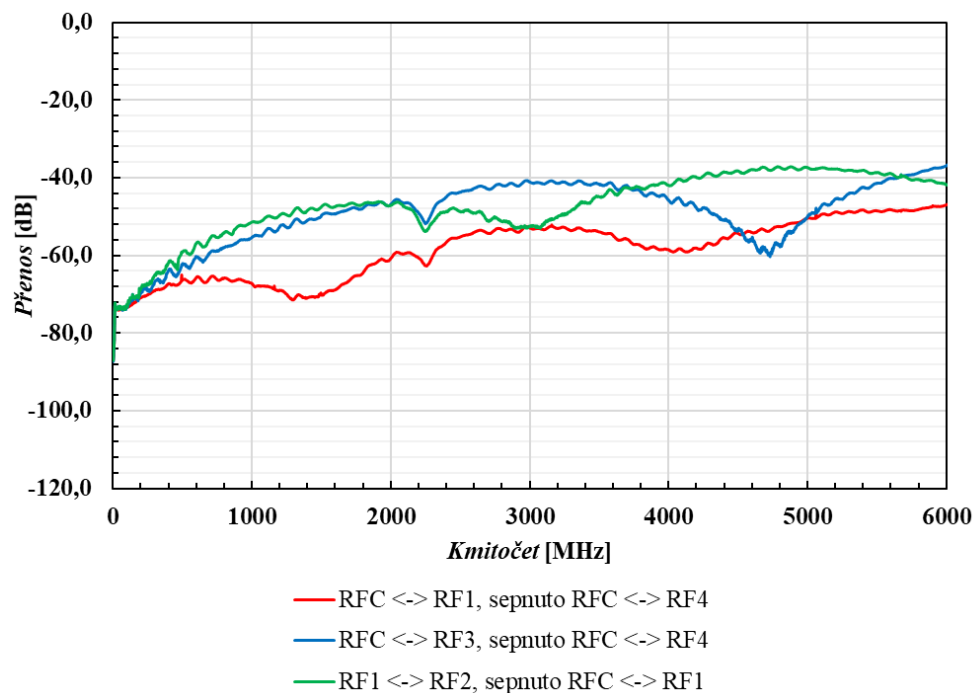
Na následujícím obrázku 3.1 převzatém z datového listu [17] je uveden průběh vložného útlumu a izolace v závislosti na kmitočtu pro přepínač ve formě IO Analog Devices ADRF 5040. Tyto parametry byly změřeny na vzorku přepínače na vývojové desce, který je vidět na obrázku 3.4. Výsledky měření jsou pak vidět na obrázcích 3.2 a 3.3, přenos pro zjištění vložného útlumu a izolace byl měřen pouze pro vybrané sepnuté cesty (nejhorší případ) a v požadovaném kmitočtovém rozsahu.



Obrázek 3.1 Grafy průběhu *vložného útlumu* a *izolace* v závislosti na kmitočtu přepínače ADRF 5040, měřeno výrobcem a převzato z [17].



Obrázek 3.2 Graf průběhu *přenosu* v závislosti na kmitočtu určujícího *vložný útlum* pro dvě různé sepnuté cesty přepínače ADRF 5040.

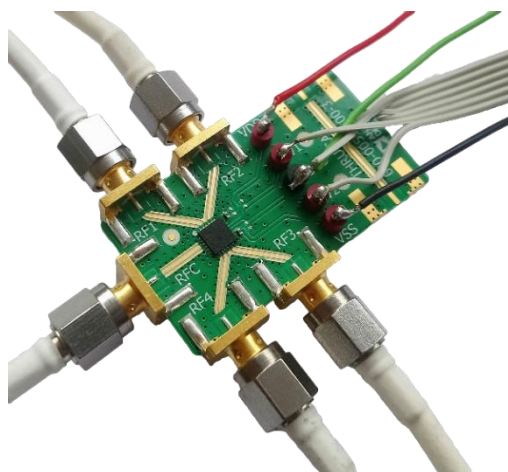


Obrázek 3.3 Graf průběhu *přenosu* v závislosti na kmitočtu určujícího *izolaci* mezi porty přepínače ADRF 5040.

Měření průběhů v předchozích grafech (obrázek 3.2 a 3.3) bylo provedeno spektrálním analyzátozem Rohde & Schwarz FSL.

Výsledky měření se téměř shodují s údaji výrobce. Vložný útlum se v celém kmitočtovém pásmu pohybuje od 0,5 dB do 1 dB a izolace je pro nejhorší případ 36 dB (sepnuto RFC <-> RF1, izolace RF1 <-> RF2).

Na základě těchto zjištění bylo rozhodnuto, že tyto přepínače ADRF 5040 ve formě IO nelze použít ve větším počtu, a to z důvodu vysoké hodnoty vložného útlumu. V případě modifikace vysokofrekvenční jednotky, kdy by nebylo potřeba pět přepínačů, lze tento typ využít.



Obrázek 3.4 Zapojený koaxiální přepínač Analog Devices ADRF 5040 na vývojové desce.

V kapitole 2.2 Koaxiální přepínače bylo uvedeno několik typů elektromechanických přepínačů od různých výrobců spolu s upřesněním požadavků pro výběr. Dalšími kritérii pro výběr konkrétního přepínače byly dostupnost a cena. Všem těmto podmínkám vyhověli následující přepínače:

SP4T: TEleRel TR04-N28S181-D

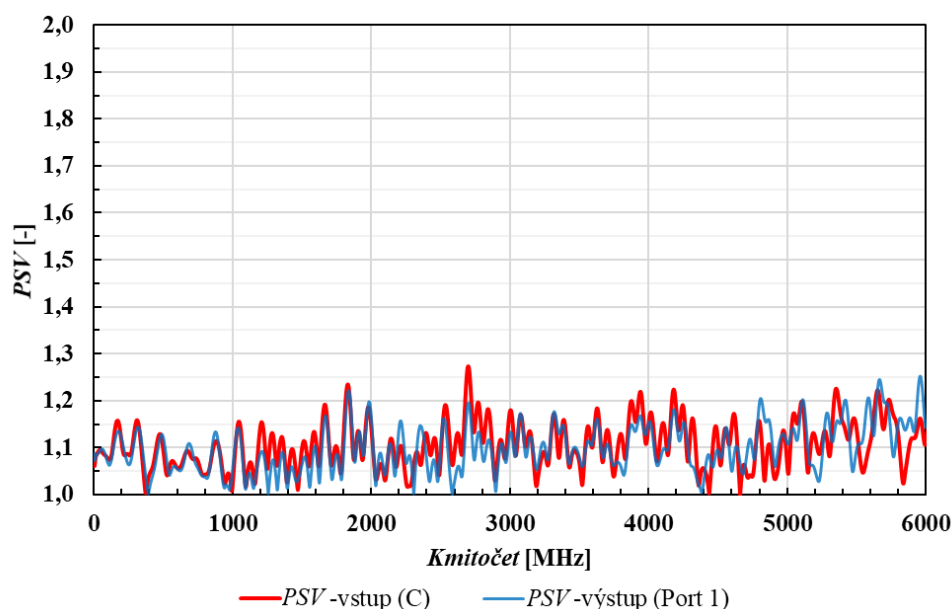
Koaxiální přepínač je určen pro výběr antény a další dva pak pro výběr zesilovače nebo atenuátoru (přímé propojení, další zařízení).

Pro připojení napájení a propojení s ovládací jednotkou byla navržena DPS s konektory, která propojuje konektor pro plochý kabel 10 žil (ovládání) a svorkovnici (napájení) s D-SUB konektorem na přepínači, viz příloha C.4 Konektorová deska pro koaxiální přepínač TEleRel. Pro připojení VF signálu je přepínač vybaven SMA konektory. Přepínač je upevněn na DIN liště pomocí držáku, viz obrázek 3.8. Tento způsob upevnění umožňuje polohování každého přepínače zvlášť v horizontálním směru.

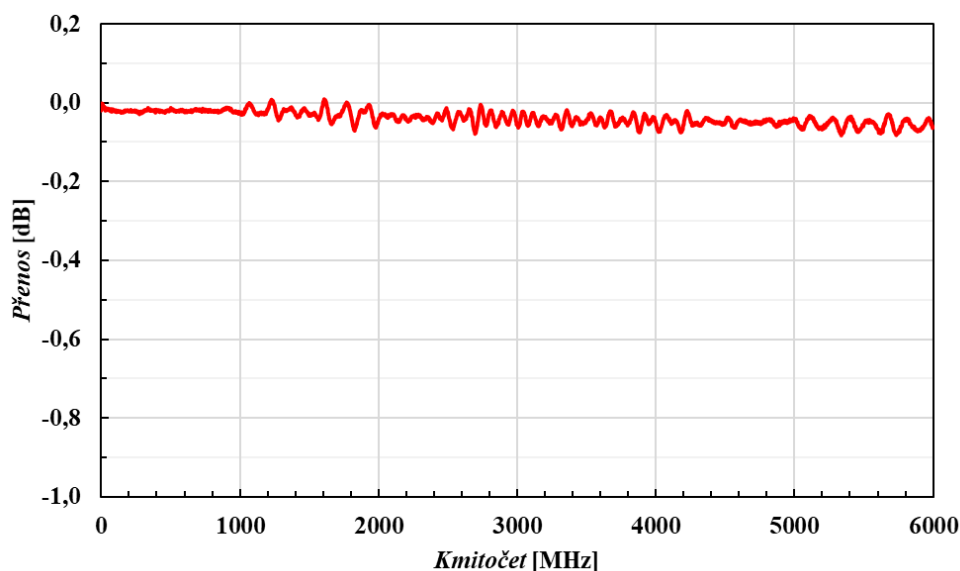
Výrobce neuvádí průběhy vložného útlumu, *PSV* a izolace v grafické podobě, ale pouze jako jednu hodnotu v kmitočtovém rozsahu, viz tabulka 3.1, převzato z [18].

Tabulka 3.1 Parametry přepínače TEleRel TR04 v kmitočtovém rozsahu 0 – 6 GHz udávané výrobcem [18].

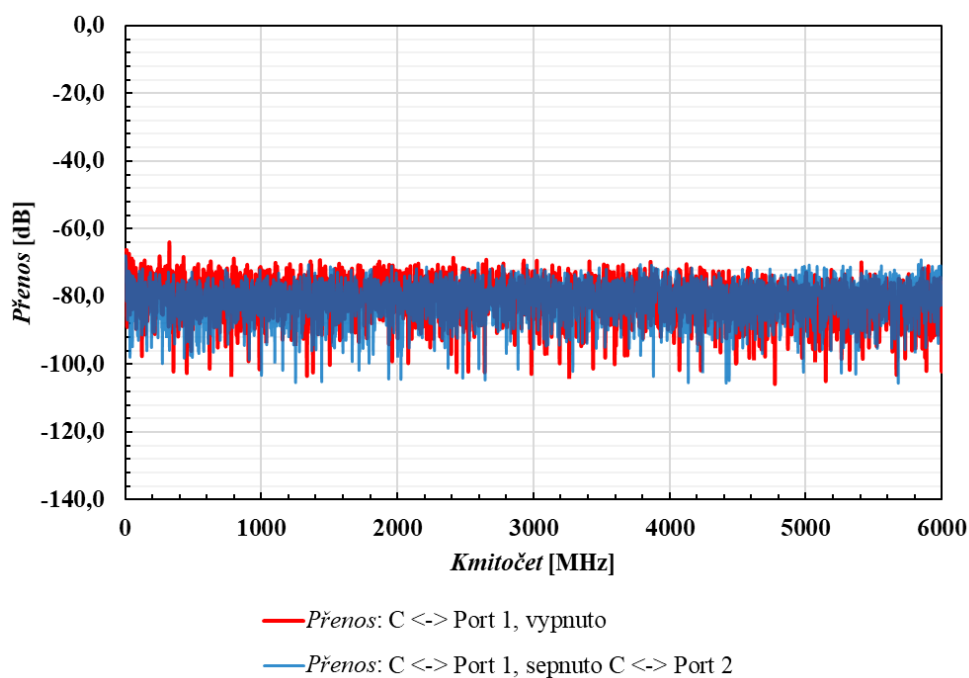
Kmitočtový rozsah [GHz]	<i>PSV</i> (max.) [-]	Vložný útlum (max.) [dB]	Izolace (min.) [dB]
0 – 6	1,3	0,3	70



Obrázek 3.5 Graf průběhu *PSV* na vstupu (C) a na výstupu (Port 1) v závislosti na kmitočtu přepínače TEleRel TR04 pro sepnutou cestu C <-> Port 1.



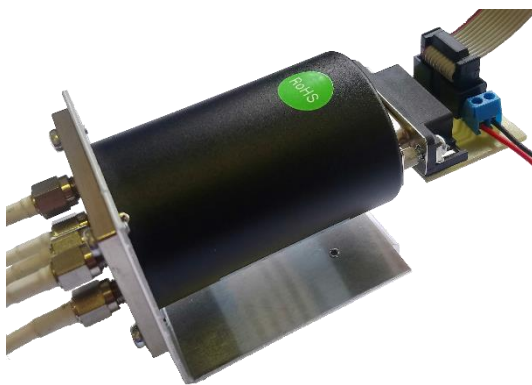
Obrázek 3.6 Graf průběhu *přenosu* v závislosti na kmitočtu určujícího *vložný útlum* pro sepnutou cestu C <-> Port 1 přepínače TEleRel TR04.



Obrázek 3.7 Graf průběhu *přenosu* v závislosti na kmitočtu určujícího *izolaci* mezi C a Port 1 přepínače TEleRel TR04.

Průběhy v předchozích grafech (obrázek 3.5 až 3.7) byly měřeny v laboratoři UREL vektorovým obvodovým analyzátozem Agilent Technologies EC5071C.

Parametry přepínače udávané výrobcem v kmitočtovém rozsahu 0 – 6 GHz se shodují s naměřenými hodnotami. Z těchto výsledků vyplývá, že vybraný koaxiální přepínač lze použít.



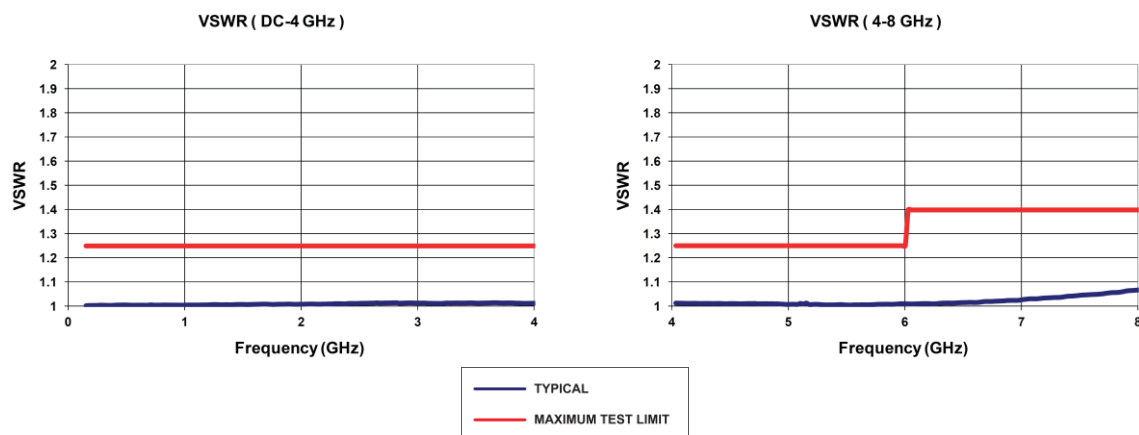
Obrázek 3.8 Zapojený koaxiální přepínač TEleRel TR04 s deskou pro připojení ovládání a napájení a držákem na DIN lištu.

SP6T: Teledyne CCR-38S16O-TD

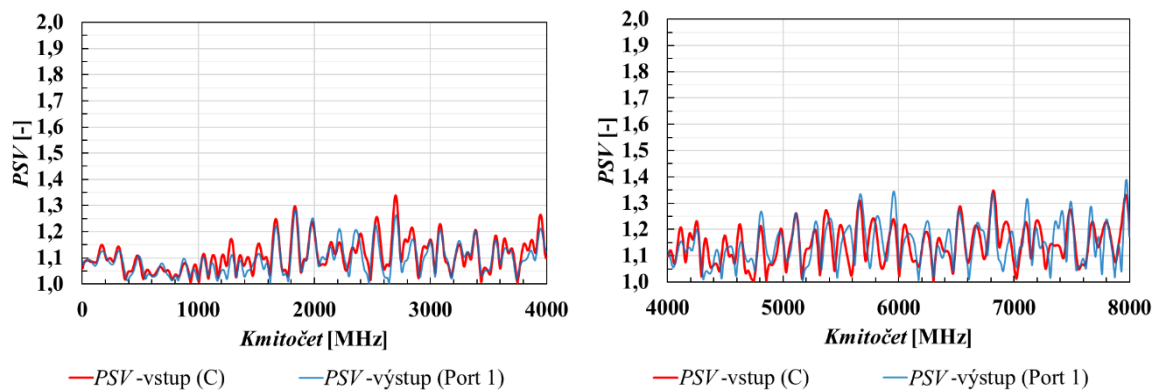
Dvojice těchto koaxiálních přepínačů bude sloužit pro výběr filtru (přímé propojení, další filtr).

Pro připojení napájení a propojení s ovládací jednotkou byla navržena deska s konektory stejně jako u přepínače TEleRel TR04, viz příloha C.2 Konektorová deska pro koaxiální přepínač Teledyne. Koaxiální přepínač je opět s SMA konektory a je upevněn na DIN lištu, viz obrázek 3.15.

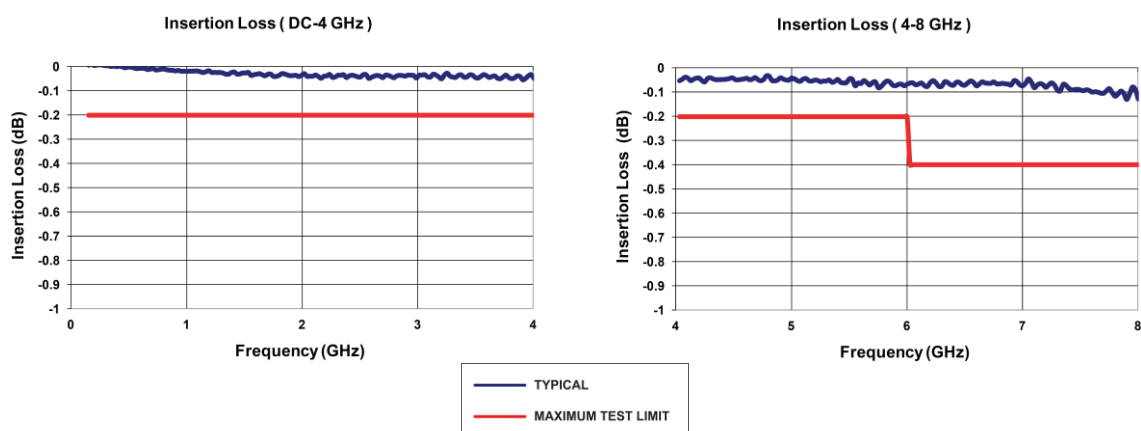
V následujících grafech jsou uvedeny průběhy *PSV*, vloženého útlumu a izolace, a to nejprve od výrobce (převzato z [19]) a následně výsledky měření.



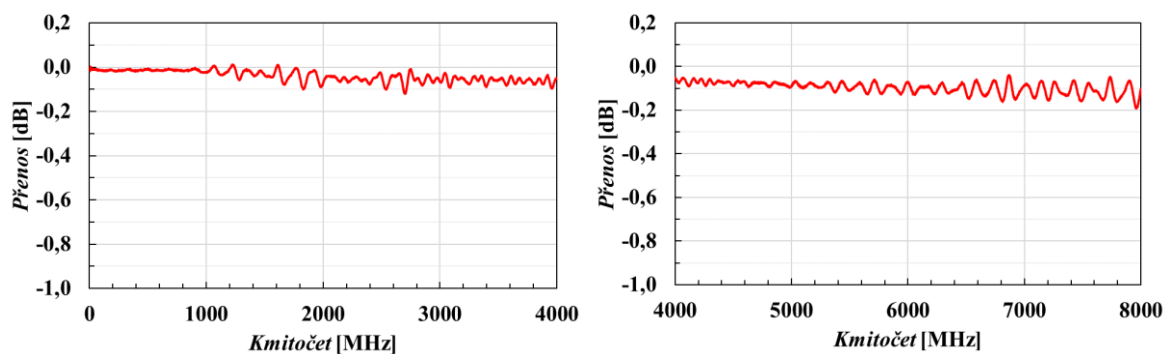
Obrázek 3.9 Grafy průběhu *PSV* v závislosti na kmitočtu přepínače Teledyne CCR-38 udávané výrobcem, převzato z [19].



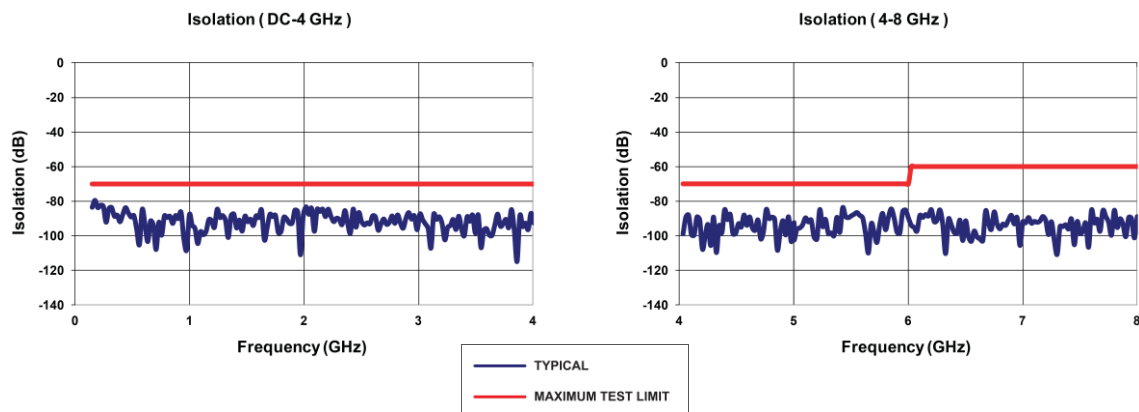
Obrázek 3.10 Grafy průběhu *PSV* na vstupu (C) a na výstupu (J1) v závislosti na kmitočtu přepínače Teledyne CCR-38 pro sepnutou cestu C \leftrightarrow J1.



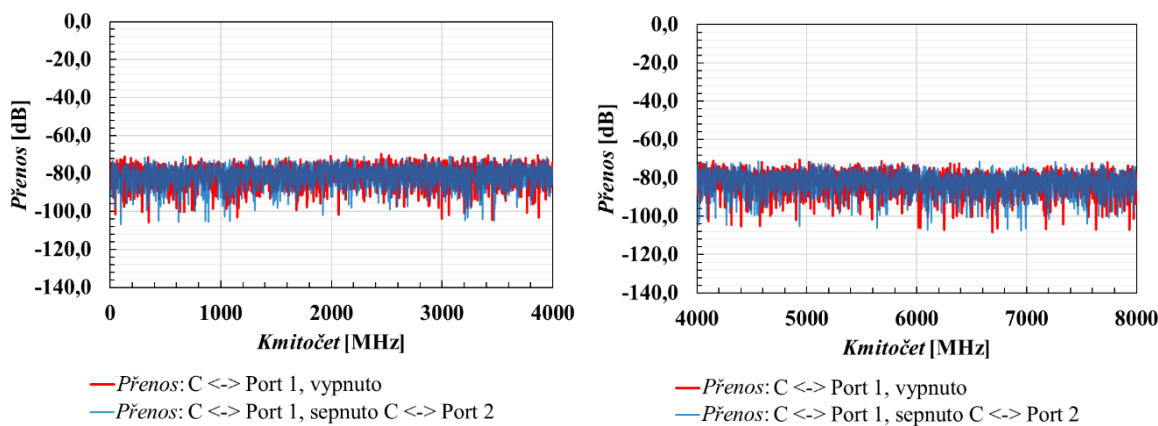
Obrázek 3.11 Grafy průběhu *vložného útlumu* v závislosti na kmitočtu přepínače Teledyne CCR-38 udávané výrobcem, převzato z [19].



Obrázek 3.12 Grafy průběhu *přenosu* v závislosti na kmitočtu určujícího *vložný útlum* pro sepnutou cestu C \leftrightarrow J1 přepínače Teledyne CCR-38.



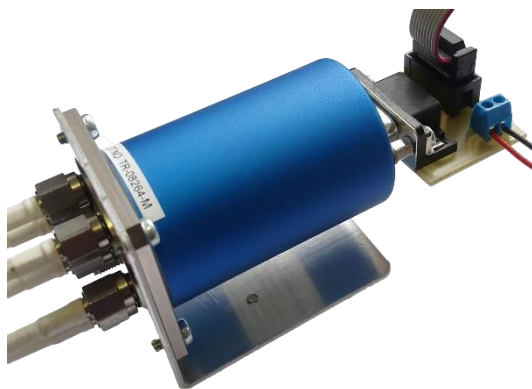
Obrázek 3.13 Grafy průběhu *izolace* v závislosti na kmitočtu přepínače Teledyne CCR-38 udávané výrobcem, převzato z [19].



Obrázek 3.14 Graf průběhu *přenosu* v závislosti na kmitočtu určujícího *izolaci* mezi C a J1 přepínače Teledyne CCR-38.

Průběhy v předchozích grafech (obrázek 3.10, 3.12 a 3.14) byly měřeny v laboratoři UREL vektorovým obvodovým analyzátozem Agilent Technologies EC5071C.

Parametry přepínače udávané výrobcem v kmitočtovém rozsahu 0 – 4 GHz a 0 – 8 GHz se shodují s naměřenými hodnotami. Z těchto výsledků vyplývá, že vybraný koaxiální přepínač lze použít.



Obrázek 3.15 Zapojený koaxiální přepínač Teledyne CCR-38 s deskou pro připojení ovládání a napájení a držákem na DIN lištu.

Srovnání výsledků měření všech koaxiálních přepínačů spolu s hodnotami udávanými výrobcem je vidět v následující tabulce 3.2.

Tabulka 3.2 Srovnání naměřených parametrů s parametry uvedenými výrobcem.

Přepínač	Kmitočtový rozsah [GHz]	Vložený útlum [dB]		PSV [-]		Izolace [dB]	
		Výrobce	Měření	Výrobce	Měření	Výrobce	Měření
Analog Devices ADRF 5040	0 – 6	0,8 (typ.)	1,1 (max.)	-	-	34 (typ.)	37 (min.)
TEleRel TR04	0 – 6	0,3 (max.)	0,15 (max.)	1,3 (max.)	1,35 (max.)	70 (min.)	64 (min.)
Teledyne CCR-38	0 – 4	0,1 (typ.)	0,12 (max.)	1,05 (typ.)	1,34 (max.)	80 (typ.)	70 (min.)
	4 – 8	0,2 (typ.)	0,19 (max.)	1,1 (typ.)	1,39 (max.)	80 (typ.)	71 (min.)

3.2 Sada filtrů

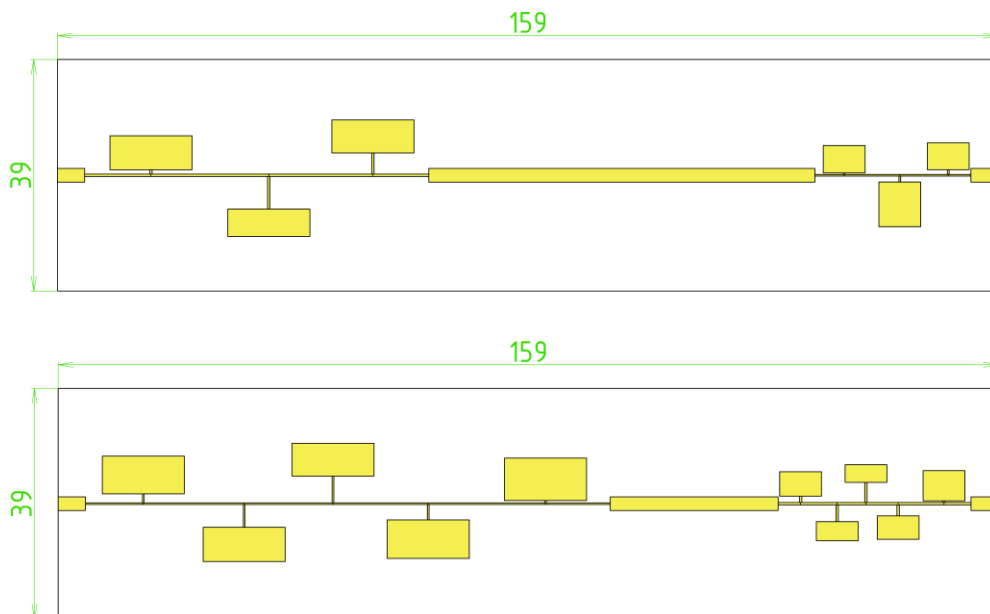
Návrh všech čtyř filtrů byl popsán v kapitole 2.3 Sada filtrů. Zde bude popsána realizace spolu s optimalizací pro dosažení požadovaných parametrů.

Každý filtr je umístěn v kovové krabici, která je opatřena držákem na DIN lištu. Pro připojení VF signálu slouží dvojice SMA konektorů (female, normální polarita)

3.2.1 Dolní propust s mezním kmitočtem 1 GHz

Dolní propust byla realizována planární technologií z úseků mikropáskového vedení na substrátu Arlon 600.

Na následujícím obrázku 3.16 je vidět motiv filtru (kaskáda DP s mezním kmitočtem 1 GHz a 2,5 GHz), který je výsledkem návrhu z kapitoly 2.3.1 Dolní propust s mezním kmitočtem 1 GHz. Byl vyroben 7. řád i 11. řád filtru pro porovnání parametrů a následný výběr vhodnějšího.



Obrázek 3.16 Výsledné motivy filtru dolní propust 1 GHz 7. řádu (nahore) a 11. řádu (dole).

Hlavním požadavkem při výrobě monitorovací stanice bylo dosažení co nejnižší hmotnosti, a proto většina konstrukčních dílů, pokud to bylo možné, byla vyrobena z hliníkového plechu. Proto i pro filtry byly nejprve vyrobeny krabičky z hliníkového plechu – dvoudílná konstrukce pospojovaná šrouby M3. Z tohoto důvodu mají filtry 7. i 11. řádu stejný rozměr (rozměr krabičky z hliníkového plechu).

Toto řešení se ukázalo jako nevhodné, a to z důvodu vzniku parazitních špiček v zádržném pásmu filtru, které způsobovaly pokles vložného útlumu až na 20 dB oproti požadovaným 40 dB. Následná optimalizace probíhala na filtru 11. řádu a všechny průběhy v grafu na obrázku 3.18 platí pro 11. řád. Vliv krabičky z hliníkového plechu je vidět v grafu na obrázku 3.18 – šedý průběh. Průběh byl měřen kombinací generátoru Rohde & Schwarz SMF 100A a real-time spektrálního analyzátoru Rohde & Schwarz FSVR, kdy nebylo dosaženo takové dynamiky jako u dalších průběhů měřených například Rohde & Schwarz FSL nebo ZVL.

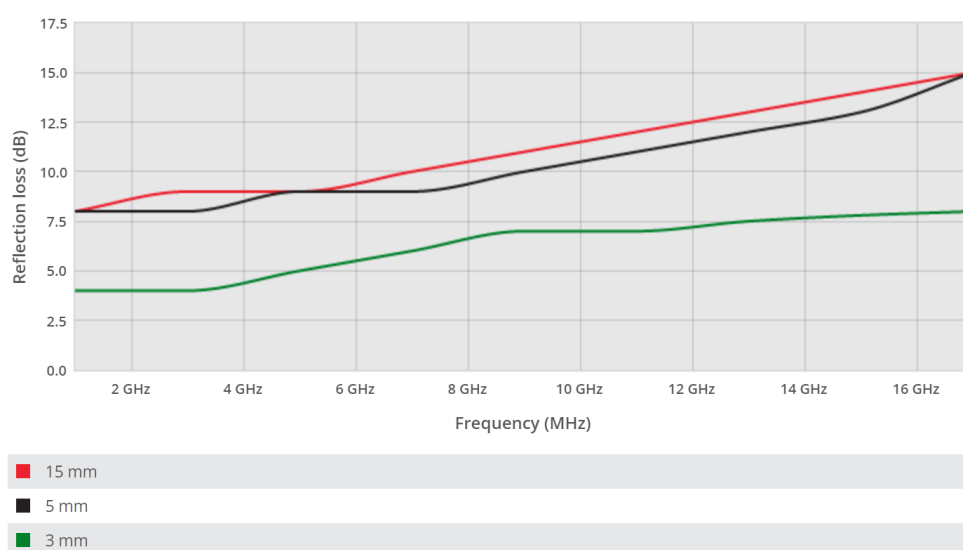
Proto byla vyrobena krabička z pocínovaného plechu, která byla sletována dohromady s filtrem. Takto byla spojena zemní plocha filtru po celém obvodu s krabičkou a taktéž konektory. Výkres této krabičky je v příloze D Mechanické a konstrukční části. Filtr umístěný v této krabičce byl měřen (R & S FSL) a výsledky jsou vidět v následujícím grafu na obrázku 3.18 – modrý průběh. Je vidět, že došlo k výraznému zlepšení vložného útlumu v zádržném pásmu. Stále nebylo dosaženo požadavku na vložný útlum minimálně 40 dB v celém zádržném pásmu, proto byl filtr dále upravován.

Mezi dvojicí filtrů spojených padesátiohmovým úsekem mikropáskového vedení byla vložena přepážka (pocínovaný plech), která zamezuje pronikání signálu ze vstupu na výstup. Další úpravou bylo použití absorbéru, který eliminuje odrazy od stěn krabičky a tedy i šíření signálu uvnitř. Byl zvolen pěnový mikrovlnný absorbér s následujícími parametry:

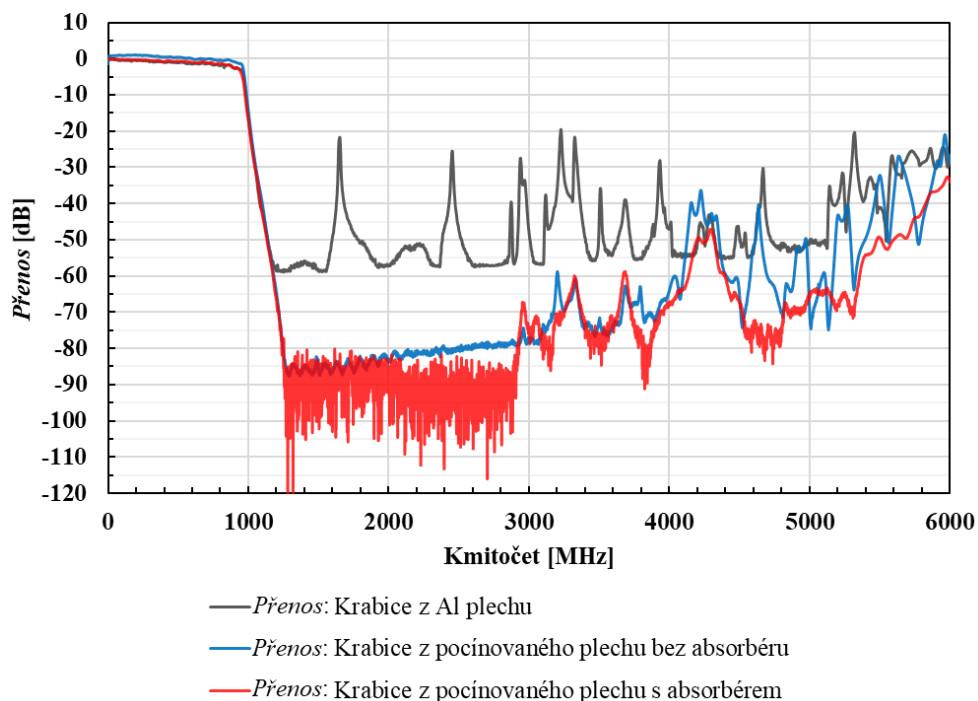
- Měkká verze (3500), výrobce Holland Shielding Systems BV [20].
- Výška 15 mm.
- Bez PSA (lepidlo citlivé na tlak).

Ztráty odrazu v závislosti na kmitočtu pro tento materiál jsou uvedené v grafu na obrázku 3.17 – červený průběh. Průběh je převzat od výrobce [20] a byl měřen v laboratorních podmínkách.

Pěnovým absorberem byla vyplněna celá krabice a poté byl filtr změřen (R & S ZVL). Výsledky měření jsou vidět na obrázku 3.18 – červený průběh. Zde je patrné, že filtr splňuje podmínku na vložný útlum v celém zádržném pásmu vyjímaje konce (zhruba 200 MHz), kde je hodnota 35 dB. Ke konci zádržného pásma použití absorberu zlepšuje hodnotu vložného útlumu až o 10 dB. Tento výsledek lze považovat pro praktické použití za dostačující.



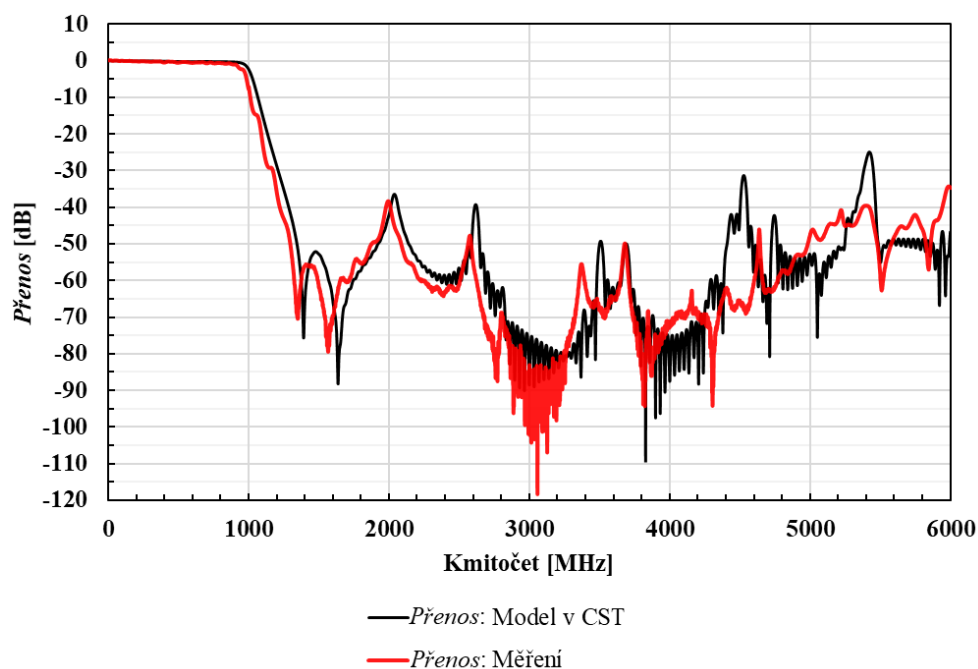
Obrázek 3.17 Graf průběhu *ztrát odrazu* pěnového mikrovlnného absorberu v závislosti na kmitočtu (průběhy pro 3 výšky absorberu), převzato z [20].

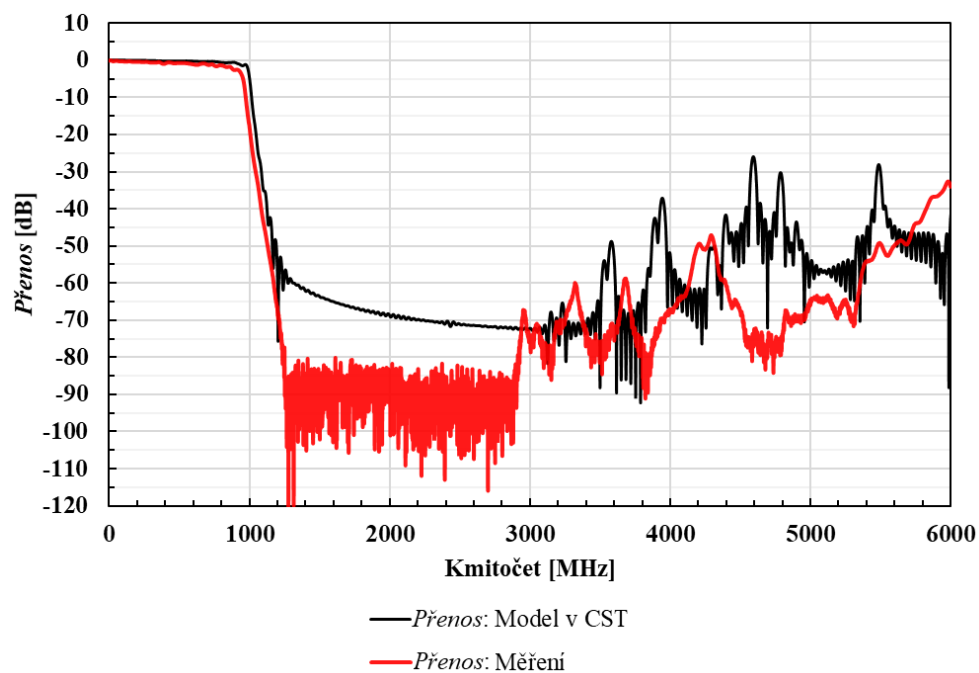


Obrázek 3.18 Graf průběhu přenosu filtru dolní propust v závislosti na kmitočtu pro postupné úpravy krabičky.

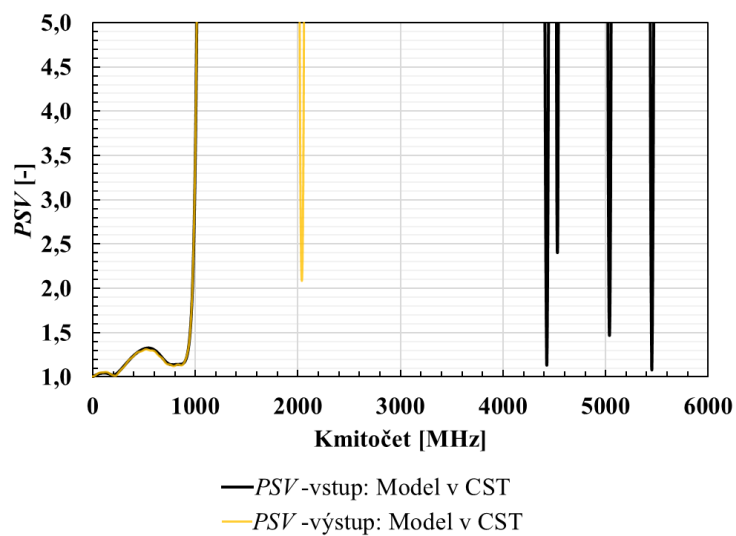
Vyrobené filtry v krabičkách z pocínovaného plechu jsou uvedeny na obrázku 3.22, kde je vidět i použití přepážky a absorbérů.

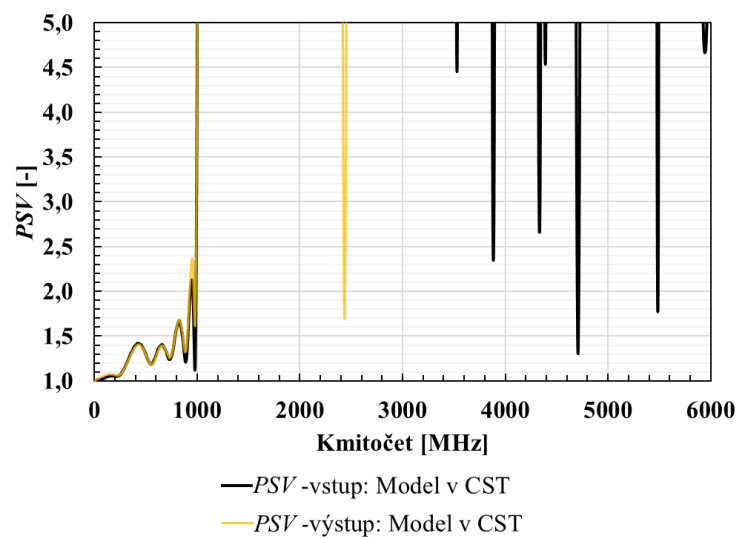
Na následujících grafech – obrázky 3.19 až 3.21 jsou výsledky měření (přenos a PSV) vyrobených filtrů (v krabičce a s absorbérem) 7. a 11. řádu v porovnání s výsledky simulací v CST. Filtr byl v CST namodelován i s krabičkou a konektory, simulace s absorbérem nebyla z důvodu náročnosti na výpočetní výkon provedena.



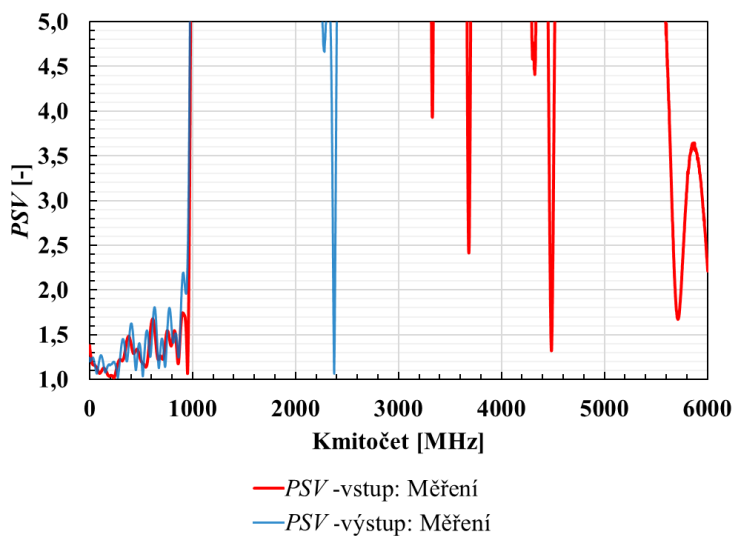
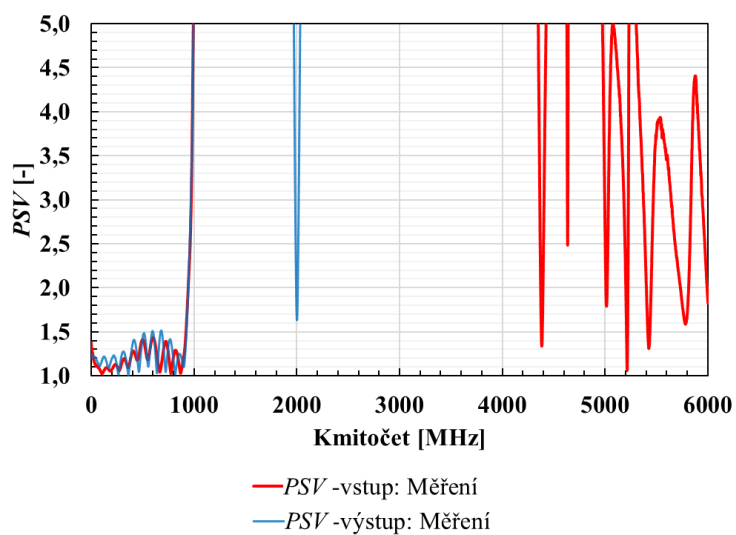


Obrázek 3.19 Graf průběhu přenosu filtru dolní propust 1 GHz 7. řádu v závislosti na kmitočtu (nahore) a 11. řádu (dole).



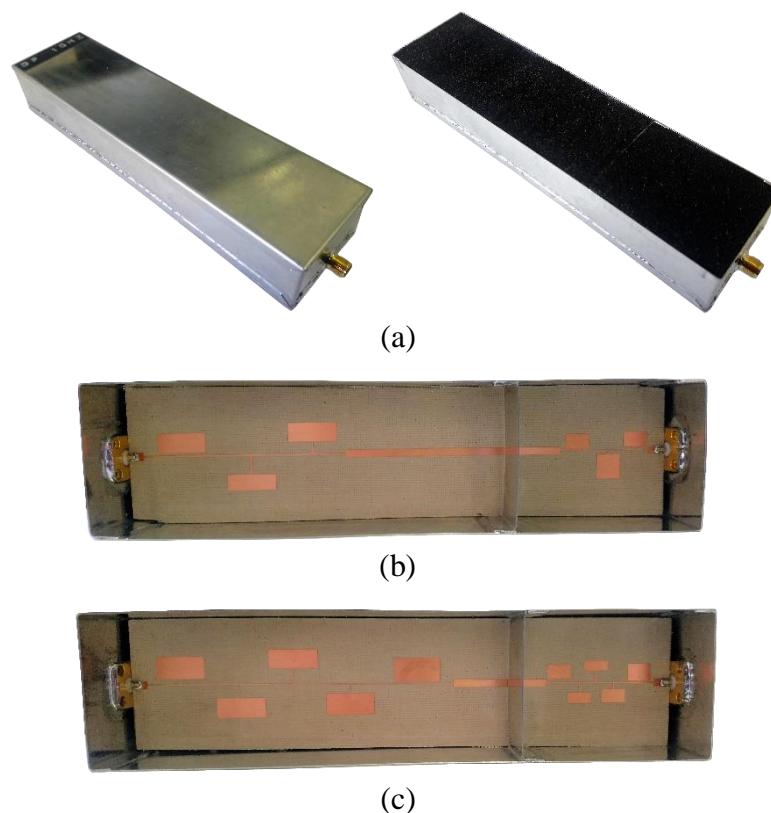


Obrázek 3.20 Graf průběhu PSV na vstupu a výstupu filtru dolní propust 1 GHz 7. řádu v závislosti na kmitočtu (nahore) a 11. řádu (dole) – simulace v CST.



Obrázek 3.21 Graf průběhu *PSV* na vstupu a výstupu filtru dolní propust 1 GHz 7. řádu v závislosti na kmitočtu (nahore) a 11. řádu (dole) – měření.

Průběhy v předchozích grafech označené jako měření byly měřeny v laboratoři UREL vektorovým obvodovým analyzátořem Rohde & Schwarz ZVL.



Obrázek 3.22 (a) filtr dolní propust 1 GHz uzavřený v krabici a použití absorbéřu, (b) filtr 7. řádu a (c) filtr 11. řádu.

Změřený průběh přenosu dosahuje lepších výsledků než průběh ze simulace v CST, což je způsobeno absencí absorbéřu v modelu filtru v CST. Co se týče *PSV*, tak se výsledky měření shodují s výsledky simulací jak pro vstup, tak i pro výstup. Vlivem určité tolerance výroby motivu filtru v dílně URELu došlo k posunu mezního kmitočtu filtru 7. řádu o 32 MHz na 968 MHz a u filtru 11. řádu o 65 MHz na 935 MHz.

Požadavky na tento filtr uvedené v tabulce 2.8 v kapitole 2.3 Sada filtrů lze považovat za splněné až na nižší hodnotu vložného útlumu u filtru 7. řádu na 2000 MHz, kdy je 38,6 dB a na konci pásma, kdy je hodnota vložného útlumu pro oba řády pouze 35 dB. *PSV* nesplňuje podmínku z tabulky 2.8 pouze u filtru 11. řádu, kdy je maximální hodnota 1,8 a od 800 MHz do 1000 MHz překračuje 2.

Z hlediska praktického použití jsou vhodné oba filtry. V případě realizace dalších filtrů by byly provedeny následující úpravy pro dosažení lepších parametrů:

- Zhotovení motivu filtru s vyšší výrobní přesností.
- Krabice vyfrézovaná z jednoho kusu hliníkové slitiny s vnitřními rozměry

přesně na rozměr desky filtru a montáž SMA konektoru zvenku.

- Zkrácení padesátiohmového úseku mikropáskového vedení mezi filtry na nezbytnou délku nebo jeho nahrazení koaxiálním kabelem a odstínění obou filtrů přepážkou.

Tento filtr bude umístěn ve skříní pro monitorovací stanici na DIN liště, krabice je opatřena deskou z hliníkového plechu 1 mm s držákem na DIN lištu.

3.2.2 Horní propust s mezním kmitočtem 1,1 GHz

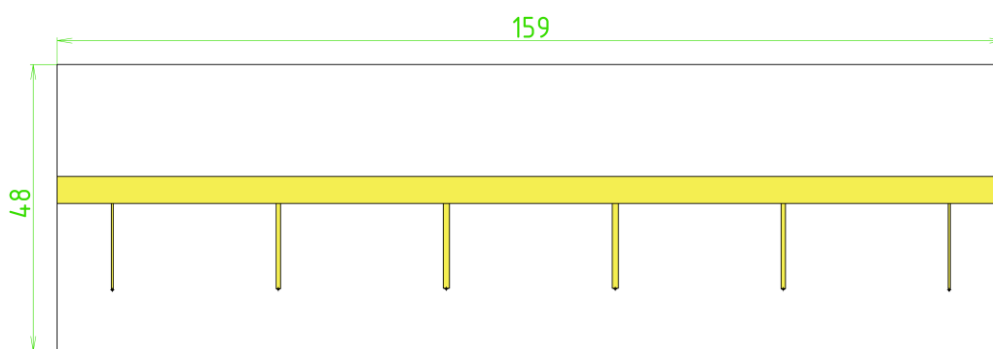
Horní propust byla realizována planární technologií z úseků mikropáskového vedení na substrátu IsoClad 933.

Na následujícím obrázku 3.23 je vidět motiv filtru, který je výsledkem návrhu z kapitoly 2.3.2 Horní propust s mezním kmitočtem 1,1 GHz.

Při prvotním návrhu filtru byly prokovy na konci pahýlů vytvořené chemicky a byl tomu přizpůsoben i motiv – malé mezikruží okolo otvoru pro prokovení, ale z důvodu větší síly materiálu (1,524 mm) nebyly vždy všechny prokovy stoprocentně vodivé. Proto bylo od tohoto výrobního procesu upuštěno a prokov byl vytvořen tak, že na konci pahýlu byl vyvrtán otvor o průměru 0,3 mm a tímto otvorem protažen měděný drát o průměru 0,3 mm a z obou stran zaletován, viz kapitola o návrhu filtru.

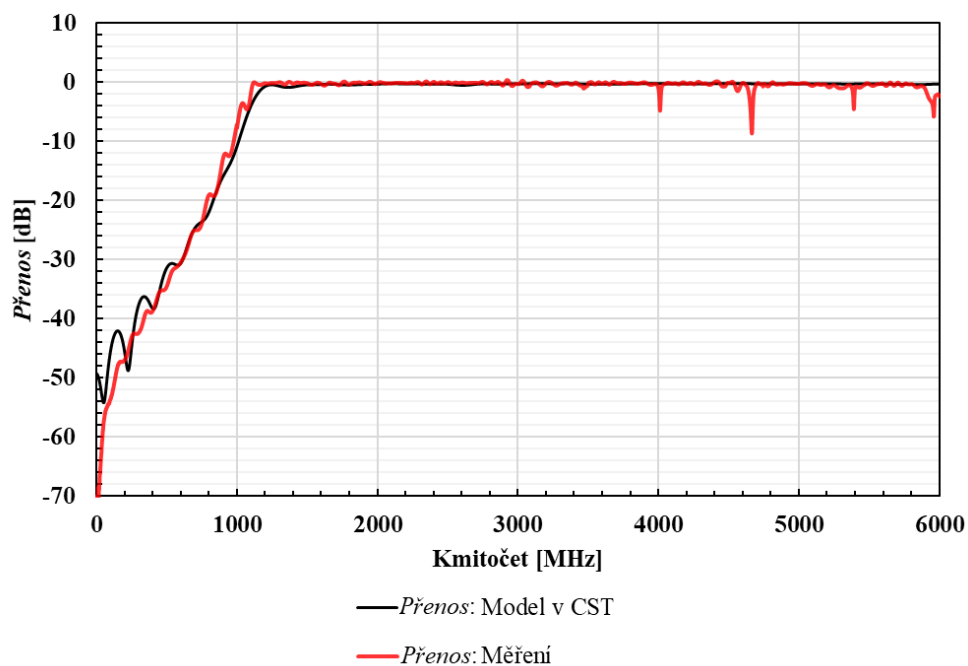
Při nedokonalém prokovení musel být prokov (průměr 0,6 mm) proveden protažením drátu a zaletováním. V tomto případě docházelo k většímu útlumu v propustném pásmu filtru.

V první fázi návrhu byla pro filtr uvažována stejná krabice z hliníkového plechu jako pro filtr dolní propust. Ze stejného důvodu (parazitní špičky v zádržném pásmu) jako u dolní propusti byla nahrazena krabičkou z pocínovaného plechu. Výkres této krabičky je v příloze D Mechanické a konstrukční části. Pro přehlednost zde nejsou uváděny naměřené výsledky pro prvotní návrh s chemicky vyrobenými prokovy a s krabičkou z hliníkového plechu.

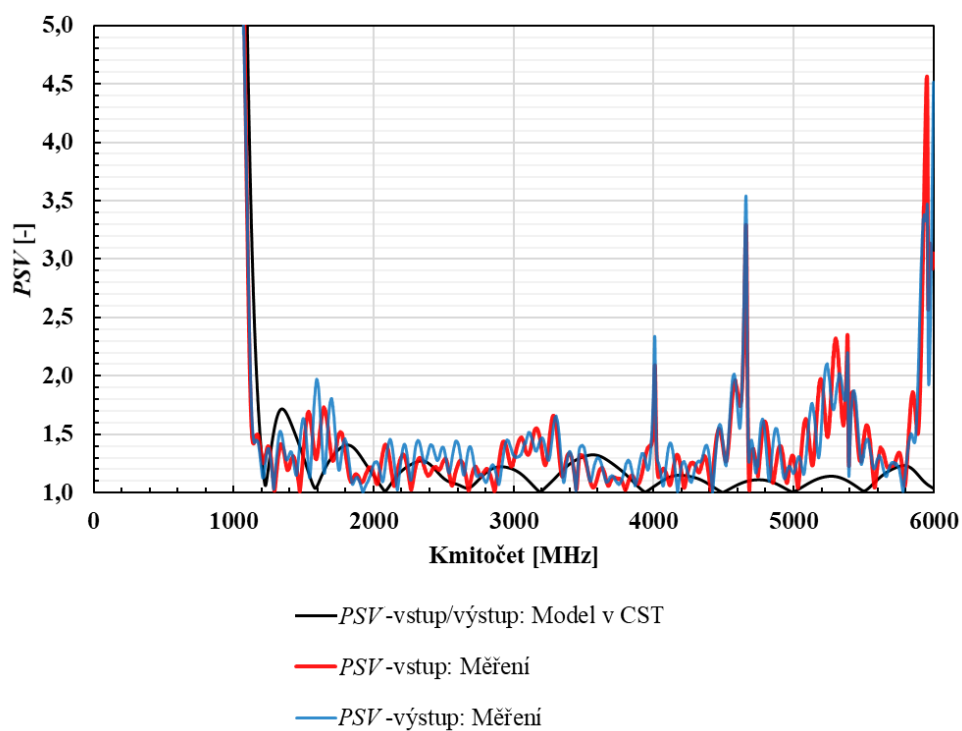


Obrázek 3.23 Výsledný motiv filtru horní propust 1,1 GHz.

Vyrobený filtr v krabice z pocínovaného plechu je vidět na obrázku 3.26. Na následujících grafech – obrázky 3.24 a 3.25 jsou výsledky měření (přenos a *PSV*) v porovnání s výsledky simulací v CST. Filtr byl v CST namodelován i s krabičkou a konektory.

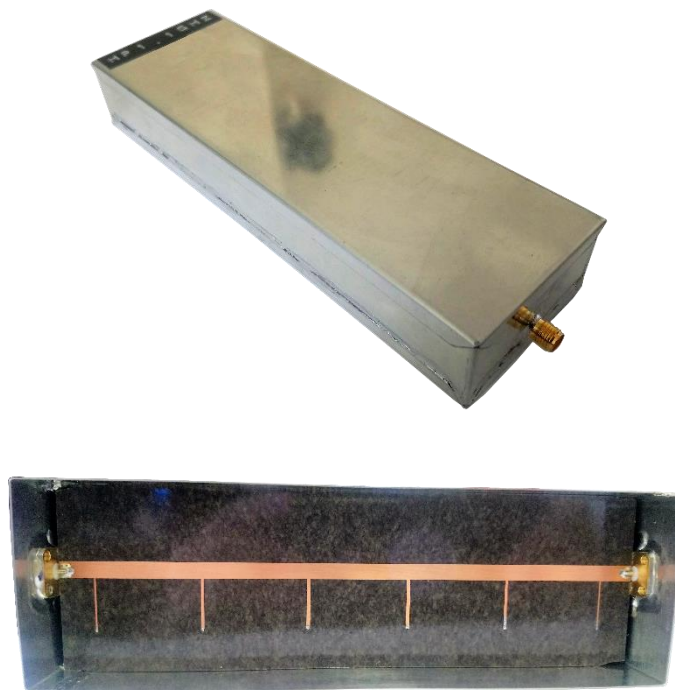


Obrázek 3.24 Graf průběhu přenosu filtru horní propust 1,1 GHz v závislosti na kmitočtu.



Obrázek 3.25 Graf průběhu PSV na vstupu a výstupu filtru horní propust 1,1 GHz v závislosti na kmitočtu.

Průběhy v předchozích grafech označené jako měření byly měřeny v laboratoři UREL vektorovým obvodovým analyzátořem Rohde & Schwarz ZVL.



Obrázek 3.26 Filtr horní propust 1,1 GHz v krabici.

Změřený průběh přenosu se téměř shoduje s výsledkem simulace v CST. Co se týče *PSV*, tak jsou výsledky měření horší než výsledky simulace jak pro vstup, tak i pro výstup. Mezní kmitočet filtru je na 1092 MHz (pokles o 3 dB).

Požadavky na tento filtr uvedené v tabulce 2.12 v kapitole 2.3 Sada filtrů lze považovat za splněné jen z části. Vložný útlum v pásmu 0 – 880 MHz je větší než 16 dB oproti požadovaným 30 dB a na kmitočtu 950 MHz je 12,5 dB, což vyhovuje podmínce >10 dB. V propustném pásmu je vložný útlum do 3 dB vyjímaje čtyř špiček, kdy je maximálně 9 dB.

PSV nesplňuje požadavek ve větší části propustného pásma, kdy je do 2 a nacházejí se zde i špičky na čtyřech kmitočtech, kdy je vyšší než 2 (maximálně 4,5) jak na vstupu, tak i na výstupu.

Špičky, které se projevují na čtyřech kmitočtech jak v průběhu přenosu i *PSV* jsou pravděpodobně způsobeny nepřesnou výrobou filtru.

Z hlediska praktického užití je filtr dostačující. V případě realizace dalších filtrů by byly provedeny následující úpravy pro dosažení lepších parametrů:

- Zhotovení motivu filtru s vyšší výrobní přesností – vytvoření kvalitních prokův (chemickou cestou).
- Krabicka vyfrézovaná z jednoho kusu hliníkové slitiny s vnitřními rozměry přesně na rozměr desky filtru a montáž SMA konektoru zvenku.

Tento filtr bude umístěn ve skříni pro monitorovací stanici na DIN liště, krabicka je opatřena deskou z hliníkového plechu 1 mm s držákem na DIN lištu.

3.2.3 Pásmová zadrž pro pásmo VKV-FM

Pásmová zadrž pro VKV-FM pásmo byla realizována z L a C součástek jako filtr 9. řádu.

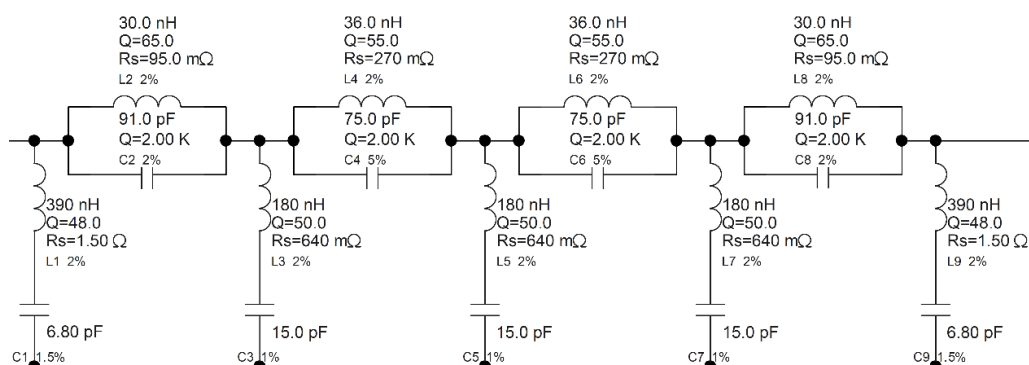
Požadavky na tento filtr a jeho návrh jsou uvedeny v kapitole 2.3.3 Pásmová zadrž pro pásmo VKV-FM. Ze dvou vhodných aproximací byla vybrána Chebyshevova aproximace. Filtr byl realizován z SMD součástek v pouzdře 0805.

Nejprve byla ověřena dostupnost součástek s hodnotami, které byly výsledkem návrhu z kapitoly 2.3.3 Pásmová zadrž pro pásmo VKV-FM. Při výběru součástek byly klíčovými parametry:

- Stejná nebo co nejbližší hodnota k výsledku návrhu.
- Tolerance – co možná nejnižší, ideálně do 5 %.
- Malý sériový odpor u cívek.
- Vysoká hodnota Q .
- Určeno pro VF aplikace.

Návrh probíhal tak, že nejprve byl vyroben první vzorek filtru a bylo zjištěno, jaký vliv na jeho parametry mají parazitní vlastnosti součástek, a jak moc se liší měření na reálném vzorku s návrhem (v tomto návrhu byly už brány v úvahu další parametry součástek), a zdali je vůbec možné filtr takto realizovat.

Výsledky byly příznivé, takže na jejich základě byl návrh filtru upraven. Výsledek je vidět na následujícím schématu – obrázek 3.27, kde jsou uvedeny hodnoty součástek spolu s jejich dalšími vlastnostmi pro výsledný návrh filtru.



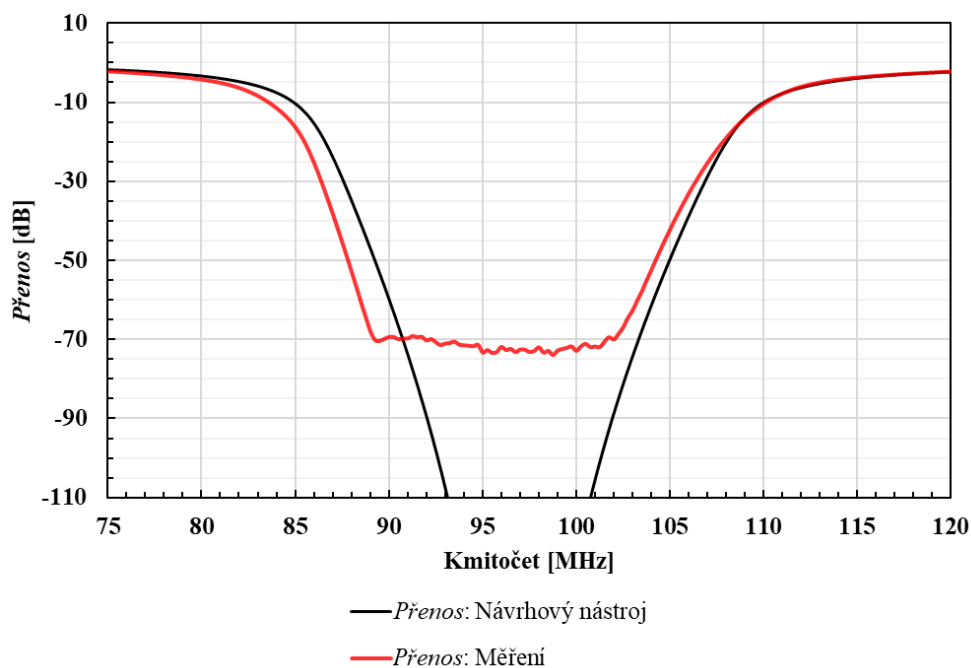
Obrázek 3.27 Schéma realizovaného filtru pásmová zadrž VKV-FM, vytvořeno v nástroji Nuhertz Filter Solutions [9].

Pro tento filtr byla navržena oboustranná deska plošných spojů, kde na spodní straně je pouze měděná plocha spojená se zemí, a ta je množstvím prokůvů propojená s motivem země na horní straně. Na desce jsou osazeny dva SMA konektory určené pro montáž na oboustrannou DPS o síle 1,5 mm. Výsledný motiv DPS spolu s osazovacím výkresem je uveden v příloze C.11 až C.14 Pásmová zadrž VKV-FM.

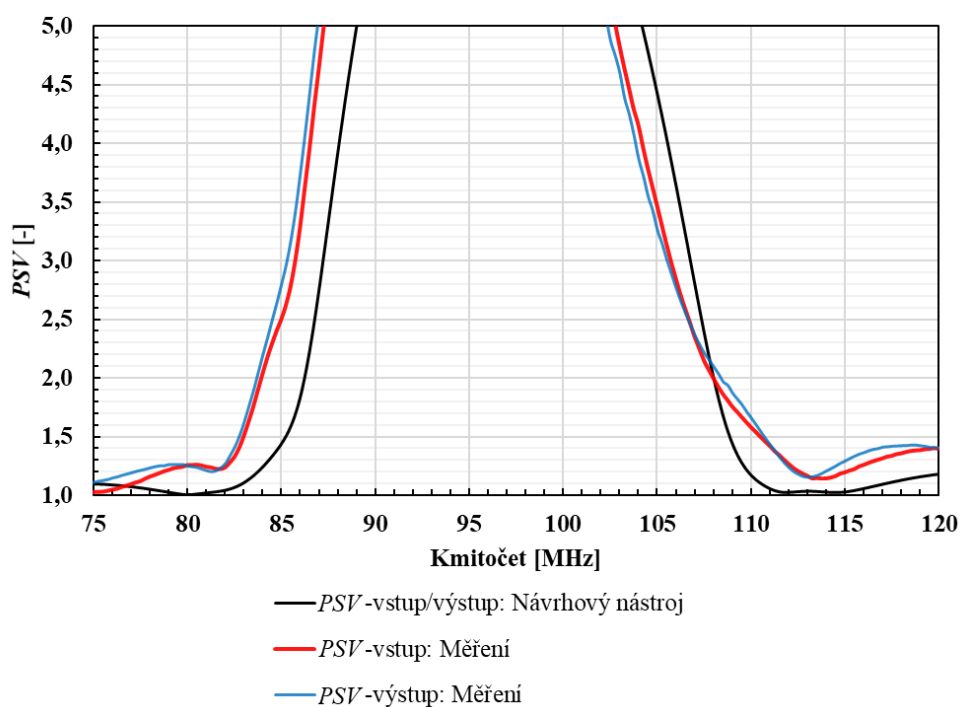
Filtr je umístěn v krabici z hliníkového plechu na čtyřech kovových distančních sloupcích a ještě je přitažen maticí na SMA konektorech s pojistnou podložkou. Krabice byla vyrobena spolu se skříní pro celou monitorovací stanici specializovanou firmou. Vyrobený filtr je vidět na obrázku 3.30.

Ve dvou následujících grafech – obrázek 3.28 a 3.29 jsou výsledky měření (přenos

a PSV) v porovnání s výsledky z návrhového nástroje Nuhertz Filter Solutions.



Obrázek 3.28 Graf průběhu přenosu filtru pásmová zádrž VKV-FM v závislosti na kmitočtu.



Obrázek 3.29 Graf průběhu PSV na vstupu a výstupu filtru pásmová zádrž VKV-FM v závislosti na kmitočtu.

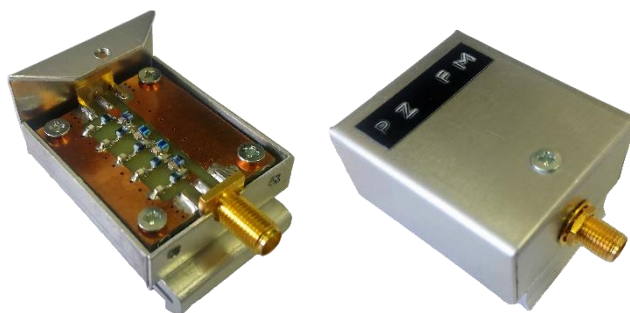
Průběhy v předchozích grafech označené jako měření byly měřeny v laboratoři UREL vektorovým obvodovým analyzátozem Rohde & Schwarz ZVL.

Změřený průběh přenosu a *PSV* se téměř shoduje s výsledkem z návrhového nástroje. Změřený průběh přenosu nedosahuje takové strmosti a došlo k posunu zádržného pásma směrem k nižším kmitočtům oproti výsledku z návrhového nástroje.

Požadavky na tento filtr uvedené v tabulce 2.16 v kapitole 2.3 Sada filtrů lze považovat za splněné jen z části. Vložný útlum v pásmu 0 – 84 MHz není menší než 3 dB (11,4 dB @ 84 MHz) a také v pásmu 112 – 1000 MHz nesplňuje tuto podmínku (6 dB @ 112 MHz). Další podmínky pro vložný útlum jsou splněny, a to v celém pásmu 0 až 1000 MHz.

PSV splňuje požadavek v celém pásmu 0 až 1000 MHz jak na vstupu, tak i na výstupu. Pro přehlednost byly grafy omezeny jen na blízkost zádržného pásma.

Zádržné pásmo vyrobeného filtru je širší zhruba o 11 MHz oproti požadavku, což je způsobeno rozdílem v hodnotě zvolených součástek oproti hodnotě z návrhu a jejich tolerancí. Toto by bylo možné odstranit kombinací kondenzátorů spolu se vzduchovými cívkami navinutými na přesnou hodnotu z návrhu a možností doladění rezonančních obvodů pomocí těchto cívek. V tomto případě by byla výroba filtru náročnější, rozměry filtru by byly větší a nedosahoval by v zádržném pásmu tak vysoké hodnoty vložného útlumu oproti verzi složené s SMD kondenzátorů a cívek. Z hlediska praktického užití je tento filtr dostačující.



Obrázek 3.30 Vyrobený filtr pásmová zádrž VKV-FM umístěný v krabici z hliníkového plechu.

Tento filtr bude umístěn ve skříní pro monitorovací stanici na DIN liště, krabice je zespodu opatřena držákem na DIN lištu.

3.2.4 Pásmová zádrž pro pásmo LTE 800 a GSM 900

Pásmová zádrž pro LTE 800 a GSM 900 pásmo byla realizována z kondenzátorů a vzduchových cívek jako filtr 9. řádu.

V první fázi návrhu bylo uvažováno stejné provedení jako u pásmové zádrže VKV-FM, a to z SMD součástek 0805.

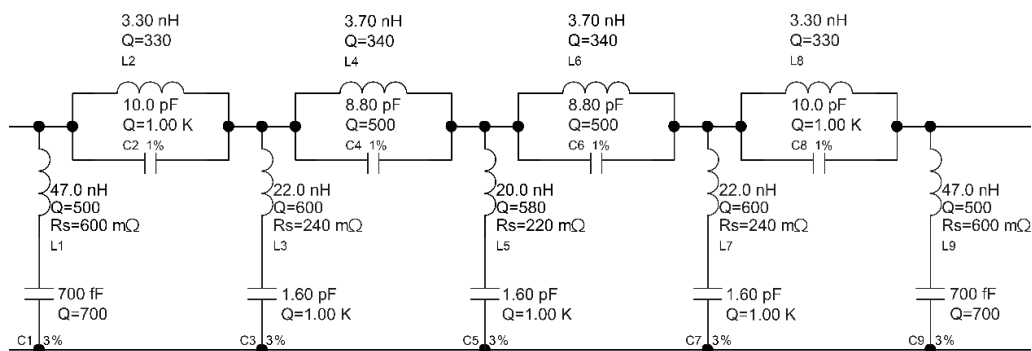
Při návrhu a následné výrobě prvního zkušební vzorku bylo zjištěno, že takto filtr realizovat nelze, a to z důvodu závislosti indukčnosti SMD cívek 0805 na kmitočtu. Na vyšších kmitočtech dochází ke zvyšování hodnoty indukčnosti cívky. Tato vlastnost se více projevuje u cívek s vyšší indukčností, a naopak méně u cívek s malou indukčností. Ukázalo se, že stačí malá změna indukčnosti a dojde ke změně parametrů filtru. Byla

vyzkoušena i postupná náhrada cívkami s menší a menší indukčností, která však nevedla k dosažení požadovaných parametrů.

Jako náhradní řešení se nabízela realizace jako dutinový laděný filtr, která by byla náročná, co se týče návrhu a realizace (mechanické provedení), a také by tento typ měl větší rozměry a vyšší hmotnost.

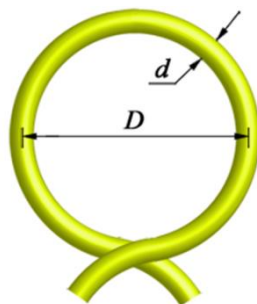
Další možností byla náhrada SMD cívek vzduchovými cívkami navinutými přesně dle návrhu. Toto řešení se ukázalo jako vhodná alternativa, co se týče návrhu a výroby. Kondenzátory byly zvoleny SMD v pouzdře 0603, cívky v podélné větvi (3,3 nH a 3,7 nH) byly realizovány jako jednozávitové a cívky v příčných větvích (47 nH, 22 nH a 20 nH) jako vícezávitové s mezerou mezi závitů. Na druhém vyrobeném vzorku filtru byly testovány cívky z měděného drátu s různým průměrem. Výsledky pro drát o průměru 0,3 mm byly neoptimálnější. Při výběru rozhodovala hodnota Q , tuhost drátu – schopnost navinout cívku a možnost ladění (změna mezery mezi závitů již osazené cívky). Byly vyzkoušeny tyto průměry drátů: 0,2 mm; 0,3 mm; 0,6 mm a 0,8 mm. Z drátu malého průměru nebylo možné vyrobit cívky s požadovanou hodnotou Q . A naopak z drátu většího průměru bylo obtížné cívky navinout a poté ladit z důvodu tuhosti drátu.

Na následujícím obrázku 3.31 je vidět schéma navrženého filtru, kde jsou uvedeny hodnoty součástek spolu s jejich dalšími vlastnostmi.



Obrázek 3.31 Schéma realizovaného filtru pásmová zádrž LTE 800 a GSM 900, vytvořeno v nástroji Nuhertz Filter Solutions [9].

Na následujícím obrázku 3.32 je jednozávitová cívka s okótovanými rozměry, které jsou uvedeny pro konkrétní hodnoty indukčnosti v tabulce 3.3. Návrh cívek probíhal ve volně dostupném nástroji Coil32 [21]. Parametry cívek byly navrhovány tak, aby je bylo možné vyrobit. Klíčovým parametrem byl průměr D a následně průměr d , podle které se cívka vinula.

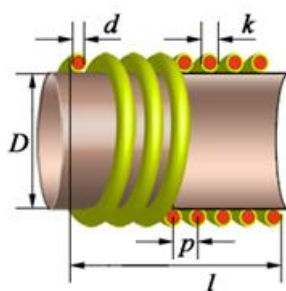


Obrázek 3.32 Jednozátvitová cívka, vytvořeno v Coil32 [21].

Tabulka 3.3 Výrobní parametry jednozátvitových cívek, výsledek návrhu v Coil32 [21].

Indukčnost [nH]	3,3	3,7
Průměr drátu d [mm]	0,3	0,3
Maximální pracovní kmitočet [MHz]	1000	1000
Průměr závitů D [mm]	2,25	2,43
Q [-]	334	345
Počet kusů	2	2

Na obrázku 3.33 je vícezátvitová cívka s mezerou mezi závitů s okótovanými rozměry, které jsou uvedeny pro konkrétní hodnoty indukčnosti v tabulce 3.4. Parametry cívek byly navrhovány tak, aby je bylo možné vyrobit. Klíčovým parametrem byl průměr formy D , podle které se cívka vinula, počet závitů, vzdálenost mezi závitů a celková délka cívky. Důležitý byl i vlastní rezonanční kmitočet navržené cívky.



Obrázek 3.33 Vícezátvitová cívka s mezerou mezi závitů, vytvořeno v Coil32 [21].

Tabulka 3.4 Výrobní parametry vícezátvitových cívek, výsledek návrhu v Coil32 [21].

Indukčnost [nH]	20	22	47
Průměr drátu d [mm]	0,3	0,3	0,3
Maximální pracovní kmitočet [MHz]	1000	1000	1000
Průměr formy D [mm]	3	3	3
Délka cívky l [mm]	4,41	6,50	9,75
Délka drátu bez přívodů [mm]	22	23	50
Vzdálenost mezi závitů p [mm]	2	3	2
Počet závitů	2	2	4,7
Sériový odpor cívky [Ω]	0,214	0,232	0,593
Mezizátvitová kapacita [pF]	0,112	0,136	0,162
Vlastní rezonanční kmitočet [MHz]	3002	3359	1819
Q [-]	587	595	498
Počet kusů	1	2	2

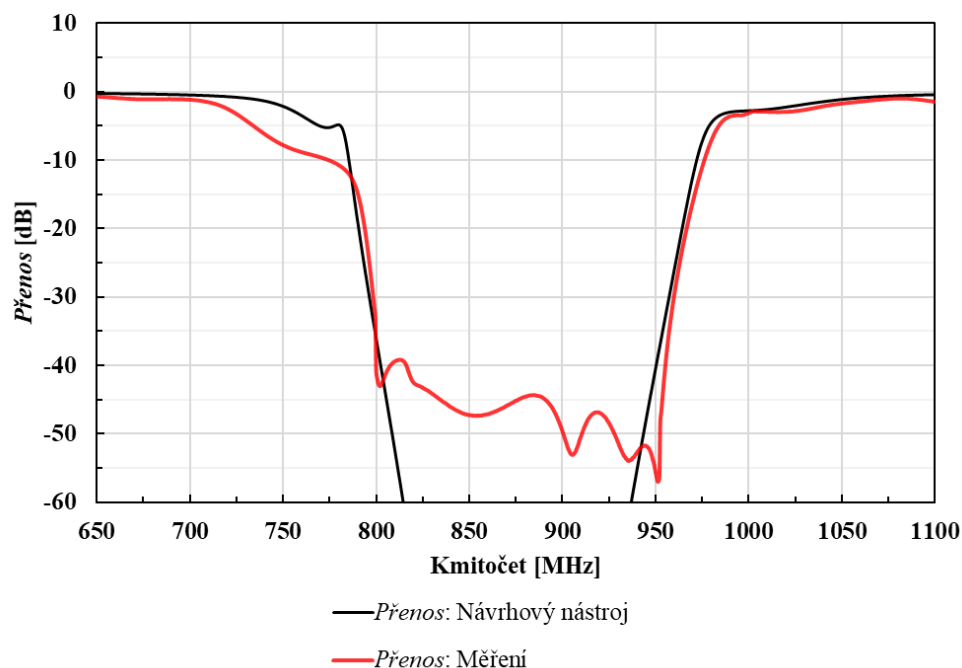
Vyrobené cívky byly osazeny na navrženou desku plošného spoje pro tento filtr. Filtr původně měl být uzavřen do stejné krabičky z hliníkového plechu jako pásmová zádrž VKV-FM, proto byla DPS pro pásmovou zádrž VKV-FM upravena tak, aby bylo možné osadit vzduchové cívky a bylo možné ji použít pro tento filtr. Výsledný motiv DPS spolu s osazovacím výkresem je uveden v příloze C.15 až C.18 Pásmová zádrž LTE 800 a GSM 900.

Nejprve byly osazeny součástky v podélné větvi filtru a následně naladěny rezonanční obvody L2/C2, L4/C4, L6/C6 a L8/C8 na jejich rezonanční kmitočty. Ladění probíhalo změnou průměru jednozávitových cívek, přičemž byl filtr připojen na spektrální analyzátor. Větší průměr závitů cívky znamená větší indukčnost a tím pádem posun rezonance obvodu k nižším kmitočtům a naopak.

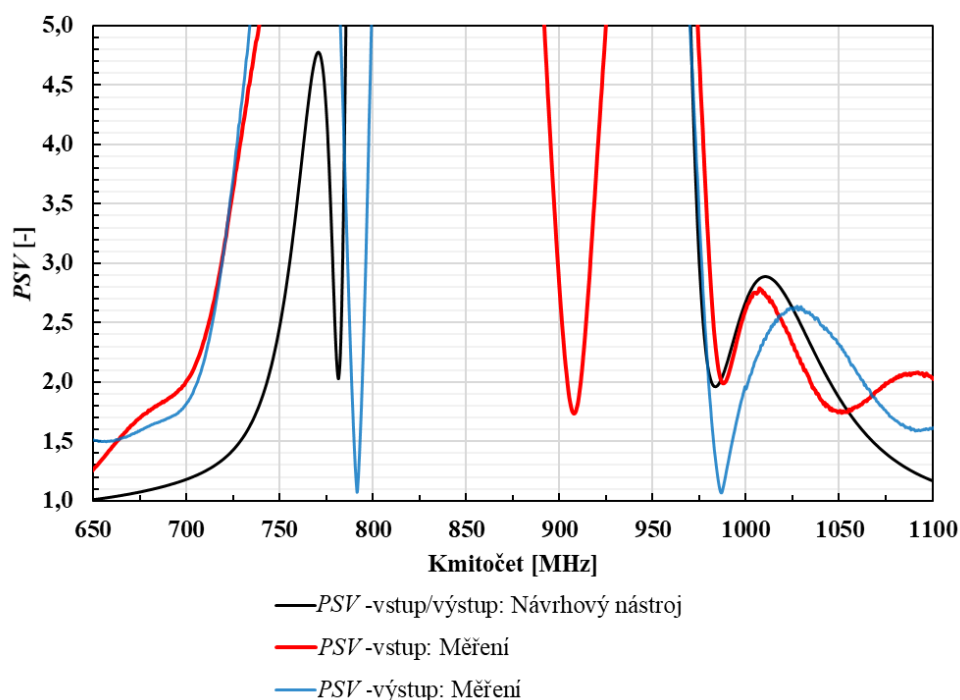
Poté byly osazeny součástky i v příčných větvích a proběhlo naladění pro dosažení požadovaných parametrů pomocí změny mezery mezi jednotlivými závitů cívek. Větší mezera mezi závitů znamená menší indukčnost a tím pádem posun rezonance obvodu k vyšším kmitočtům a naopak.

Tímto způsobem byl filtr naladěn, aby splňoval dané požadavky. Po umístění filtru do krabičky z hliníkového plechu došlo ke zhoršení vložného útlumu v zádržném pásmu. Krabička ovlivňovala Q krajních cívek (47 nH), které byly v těsné blízkosti její stěny (osa cívky kolmá na stěnu krabičky). Cívky nebylo možné orientovat jiným směrem, a proto byla vyrobena nová krabička z pocínovaného plechu, která má takové rozměry, aby neovlivňovala parametry filtru. Výkres této krabičky je v příloze D Mechanické a konstrukční části. Filtr je v krabičce upevněn pouze maticemi na SMA konektorech spolu s pojistnými podložkami. Po uzavření do krabičky byl filtr ještě doladěn.

Vyrobený filtr v krabičce z pocínovaného plechu je vidět na obrázku 3.35. Na následujících grafech – obrázky 3.34 a 3.35 jsou výsledky měření (přenos a *PSV*) v porovnání s výsledky z návrhového nástroje Nuhertz Filter Solutions.



Obrázek 3.34 Graf průběhu přenosu filtru pásmová zádrž LTE 800 a GSM 900 v závislosti na kmitočtu.



Obrázek 3.35 Graf průběhu PSV na vstupu a výstupu filtru pásmová zádrž LTE 800 a GSM 900 v závislosti na kmitočtu.

Průběhy v předchozích grafech označené jako měření byly měřeny v laboratoři UREL vektorovým obvodovým analyzátozem Rohde & Schwarz ZVL.

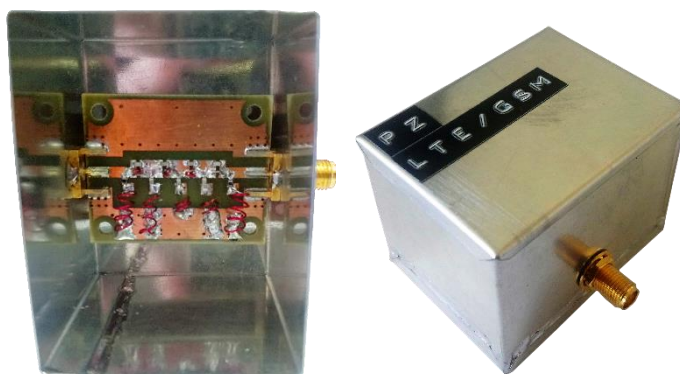
Změřený průběh přenosu a PSV se téměř shoduje s výsledkem z návrhového

nástroje.

Požadavky na tento filtr uvedené v tabulce 2.17 v kapitole 2.3 Sada filtrů lze považovat za splněné jen z části. Vložný útlum v pásmu 0 – 750 MHz není menší než 3 dB (7,8 dB @ 750 MHz). Další podmínky pro vložný útlum jsou splněny, a to v celém pásmu 0 až 2000 MHz.

PSV převyšuje požadovanou maximální hodnotu 1,8 v blízkosti mezních kmitočtů (750 MHz a 1025 MHz) jak na vstupu, tak i na výstupu. Pro přehlednost byly grafy omezeny jen na blízkost zádržného pásma.

U vyrobeného filtru dochází k většímu potlačení kmitočtů níže od dolního mezního kmitočtu, toto však nevadí, protože se zde bude nacházet pásmo LTE 700 a vysokofrekvenční jednotka MS bude poté doplněna o pásmovou zádrž pro toto pásmo, která bude pravděpodobně zařazena v kaskádě s tímto filtrem. Co se týče ostatních parametrů, filtr je v praxi použitelný.



Obrázek 3.36 Vyrobený filtr pásmová zádrž LTE 800/GSM 900 umístěný v krabici z pocínovaného plechu.

Tento filtr bude umístěn ve skříní pro monitorovací stanici na DIN liště, krabice je opatřena deskou z hliníkového plechu 1 mm s držákem na DIN lištu.

3.3 Zesilovač

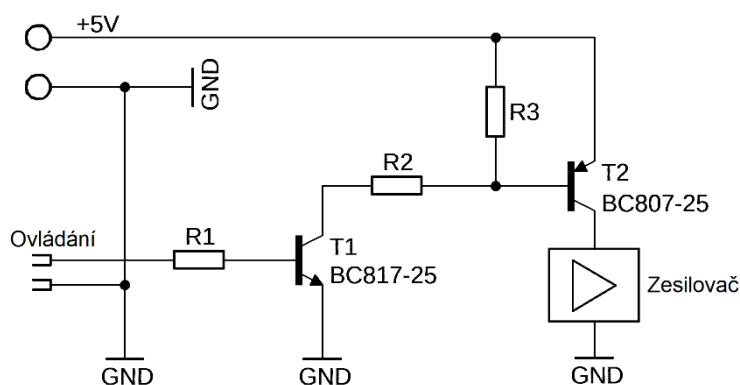
V kapitole 2.4.1 Zesilovač je uvedeno několik vybraných zesilovačů ve formě modulu od různých výrobců, které vyhovují požadavkům taktéž uvedeným v této kapitole. Pro každý zesilovač jsou zde uvedeny jeho klíčové parametry.

Z těchto zesilovačů byl vybrán Mini-Circuits ZX60-V63+, který splňuje požadavky na kmitočtový rozsah (50 MHz až 6 GHz), zisk (typická hodnota 21 dB), šumové číslo (maximálně 4,3 dB), vysokou hodnotu bodu zahrazení pro intermodulační produkty 3. řádu a bodu jednadiciblové komprese. Zesilovač je osazen SMA konektory pro připojení VF signálu a pájecími piny pro připojení napájení (5 V).

Protože zesilovač je připojen mezi koaxiální přepínače typu reflective, musí při jeho odepnutí z VF cesty dojít i k odpojení napájení, jinak hrozí jeho rozkmitání. Proto byl navržen jako součást zesilovače i spínač napájení. Ten se skládá z dvojice tranzistorů, viz schéma – obrázek 3.37.

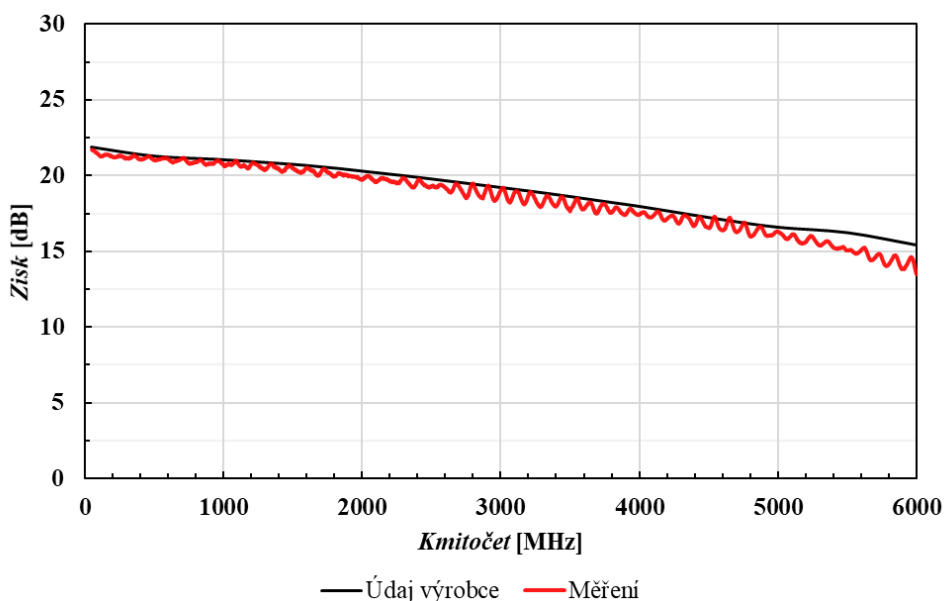
Protože je potřeba připínat a odepínat kladné napájecí napětí (+5 V), musí být použit PNP tranzistor se zátěží v kolektoru. Zapojení s NPN tranzistorem a zátěží v kolektoru nelze použít, protože zem je připojena přes pouzdro zesilovače a krabičku. Tento spínač je ještě doplněn o tranzistor NPN, který je spínán ovládací jednotkou – výstupem mikrokontroléru (vysoká úroveň) a ten následně sepne PNP tranzistor. Více je o ovládání uvedeno v kapitole 3.5 Ovládání VF jednotky.

Pro spínač byla navržena deska plošného spoje, na které je umístěn i zesilovač. Výsledný motiv DPS spolu s osazovacím výkresem je uveden v příloze C.7 až C.10 Zesilovač. Tato deska se zesilovačem je umístěna na čtyřech distančních sloupcích v krabičce z hliníkového plechu s otvory pro připojení napájení, ovládání a VF signálu. Na spodní straně krabičky je držák na DIN lištu, na které je celý modul zesilovače umístěn. Krabička byla vyrobena spolu se skříní pro celou monitorovací stanici specializovanou firmou. Kompletní modul zesilovače je vidět na obrázku 3.41.

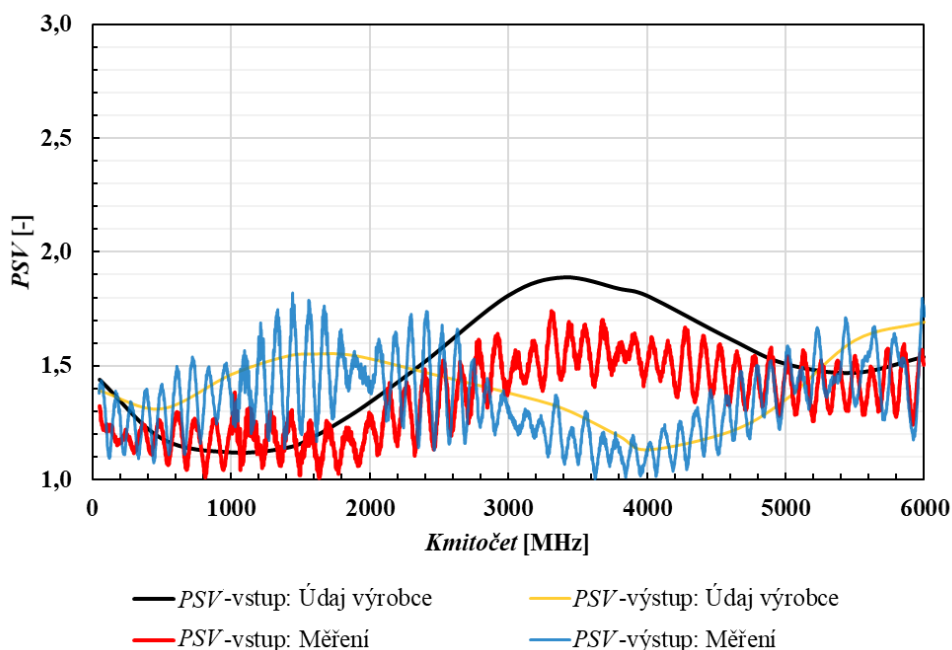


Obrázek 3.37 Schéma tranzistorového spínače pro napájení zesilovače.

Na následujících grafech – obrázky 3.38 a 3.39 jsou výsledky měření (zisk a PSV) v porovnání s údaji od výrobce.



Obrázek 3.38 Graf průběhu *zisku* zesilovače v závislosti na kmitočtu, měření a křivka udaná výrobcem [22].

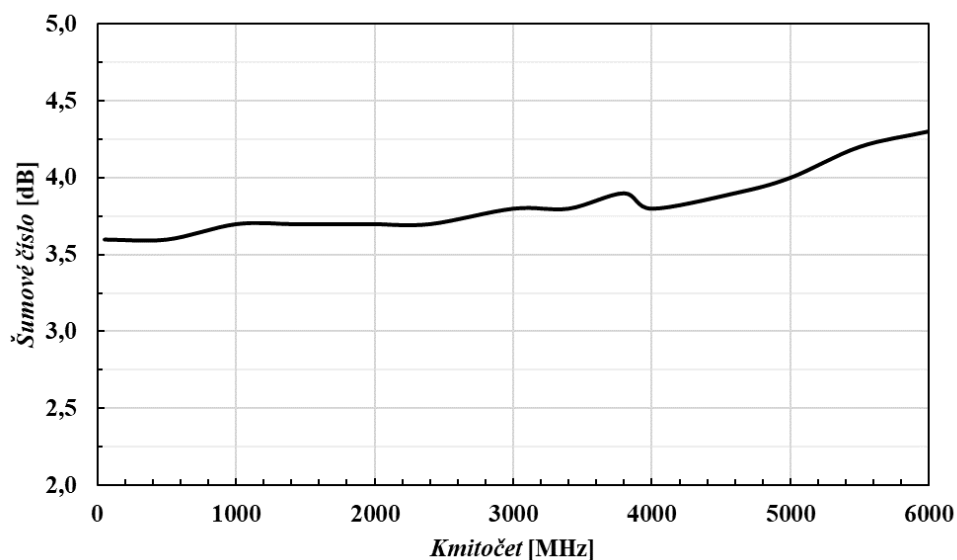


Obrázek 3.39 Graf průběhu *PSV* na vstupu a výstupu zesilovače v závislosti na kmitočtu, měření a křivka udaná výrobcem [22].

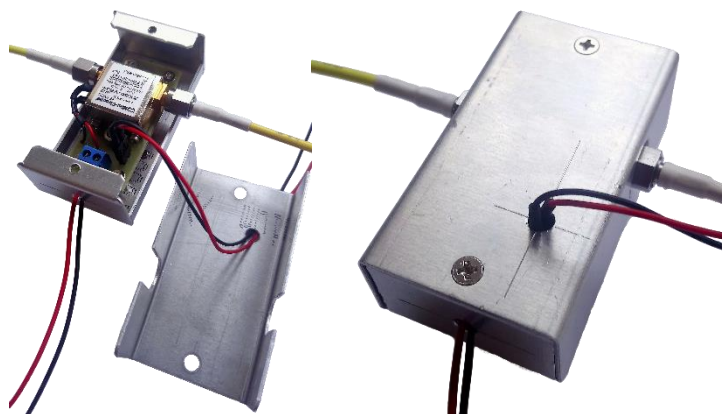
Průběhy v předchozích grafech označené jako měření byly měřeny v laboratoři UREL vektorovým obvodovým analyzátozem Rohde & Schwarz ZVL.

Výsledky měření odpovídají údajům z datového listu od výrobce. Zisk zesilovače je 27 dB @ 50 MHz a 13,5 dB @ 6000 MHz. *PSV* na vstupu i na výstupu je maximálně 1,8. Z výsledků měření vyplývá, že zesilovač je vhodný pro použití ve vysokofrekvenční jednotce monitorovací stanice.

Na následujícím grafu – obrázek 3.40 je vidět průběh šumového čísla v závislosti na kmitočtu z datového listu výrobce. Požadavek při výběru zesilovače byl maximální šumové číslo 4 dB. Toto je splněno v rozsahu 50 MHz až 5000 MHz, na kmitočtu 6000 MHz je šumové číslo 4,3 dB, což lze akceptovat.



Obrázek 3.40 Graf průběhu šumového čísla v závislosti na kmitočtu, křivka udaná výrobcem [22].



Obrázek 3.41 Širokopásmový zesilovač Mini-Circuits ZX60-V63+ v krabičce z hliníkového plechu.

3.4 Atenuátor

V kapitole 2.4.2 Atenuátor (útlumový článek) je uvedeno několik vybraných atenuátorů ve formě modulu a jako integrovaný obvod na vývojové desce od různých výrobců, které vyhovují požadavkům taktéž uvedeným v této kapitole. Pro každý atenuátor jsou zde uvedeny jeho klíčové parametry.

Nejprve bylo nutné rozhodnout mezi atenuátorem ve formě modulu nebo IO na vývojové desce. Při této volbě byly z obou skupin vyřazeny atenuátory se záporným napájecím napětím a ovládacím napětím 3,3 V. Těmito požadavky byl výběr omezen pouze na API Weinschel 3406-55 a 3404-55 (modul). Z těchto dvou byl vybrán typ

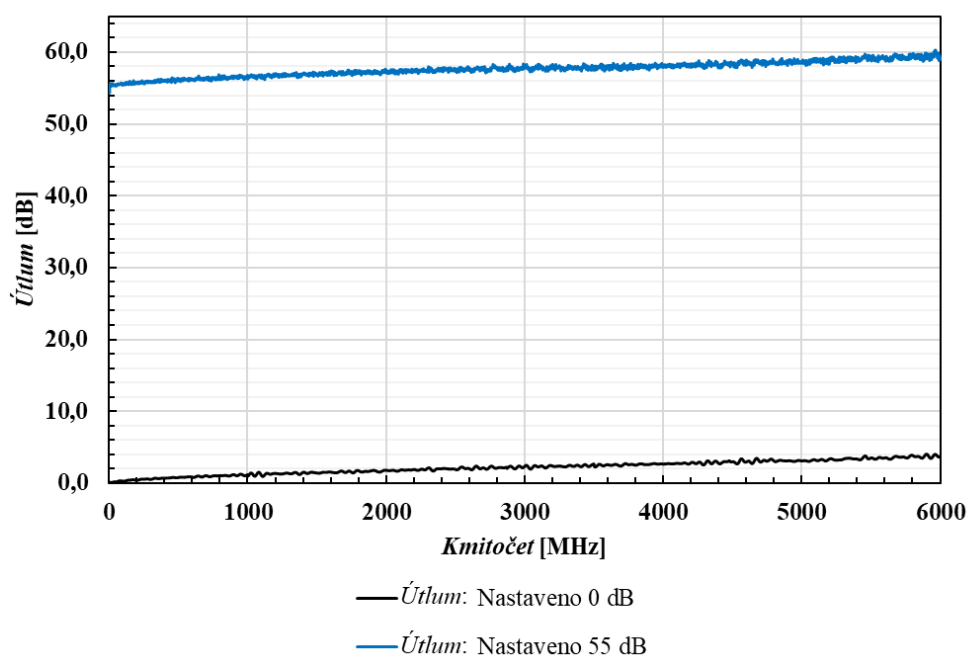
3406-55, který má 6 dílčích útlumových článků a umožňuje nastavení útlumu s krokem 1 dB.

Atenuátor je ovládán napěťovými úrovněmi HI/LO pro každý článek a tím vzniká výsledný útlum. Napájecí napětí pro atenuátor je 12 V.

Na následujících grafech – obrázky 3.42 až 3.44 jsou výsledky měření (útlum a *PSV*) a v tabulce 3.5 hodnoty udávané výrobcem.

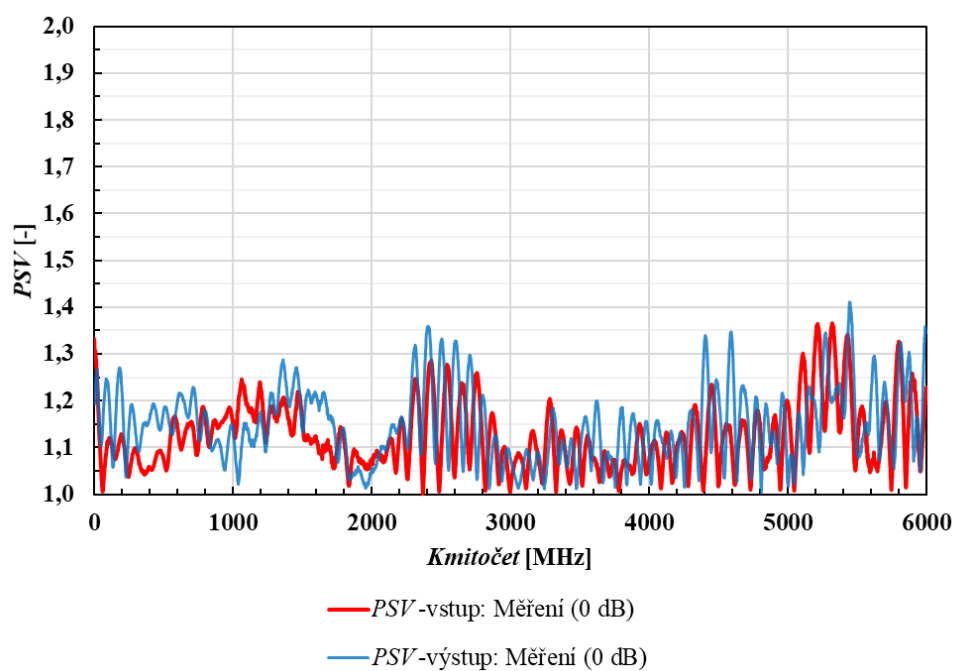
Tabulka 3.5 Parametry atenuátoru API Weinschel 3406-55 v kmitočtovém rozsahu 0 – 3 GHz a 3 – 6 GHz udávané výrobcem [23].

Kmitočtový rozsah [GHz]	<i>PSV</i> (max.) [-]	Vložný útlum (max.) [dB]	Přesnost
0 – 3	1,30	2,60	$\pm 0,3$ dB nebo 2 % podle toho, co je větší
3 – 6	1,45	3,80	$\pm 0,4$ dB nebo 3 % podle toho, co je větší

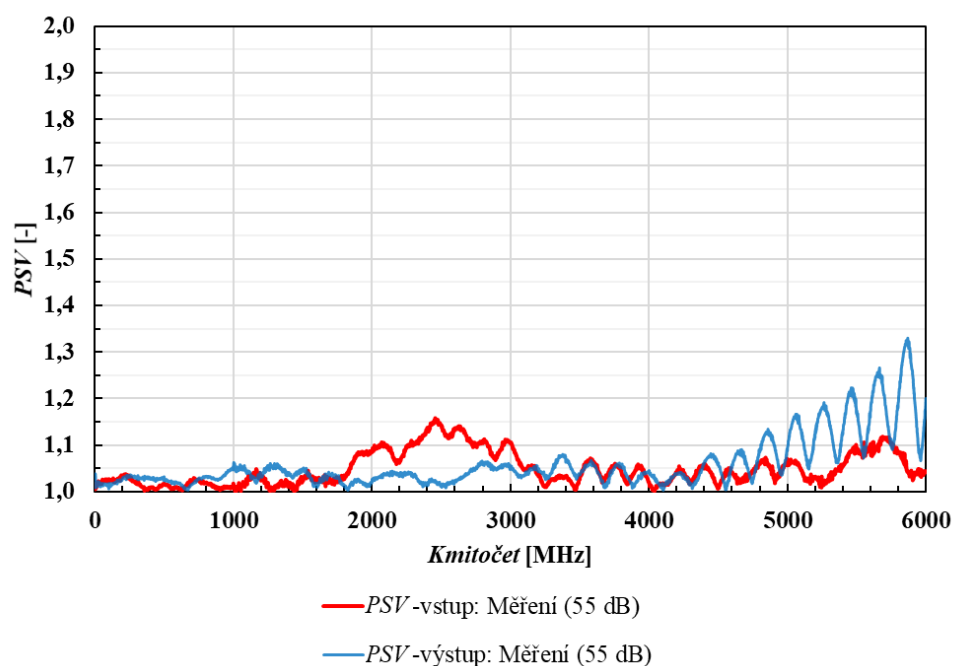


Obrázek 3.42 Graf průběhu změřeného útlumu v závislosti na kmitočtu.

Oproti hodnotám udávaným výrobcem dosahuje vložný útlum až 5 dB. Při nastavené hodnotě 0 dB útlum (měřený) téměř lineárně roste až do 6000 MHz, kde dosahuje hodnoty 4,3 dB. Pokud je nastaven maximální útlum 55 dB, je situace obdobná, měřený útlum je 60 dB @ 6000 MHz. Pro přehlednost byla změřena pouze maximální a minimální hodnota nastaveného útlumu.



Obrázek 3.43 Graf průběhu změřeného *PSV* na vstupu a výstupu attenuátoru v závislosti na kmitočtu pro nastavený útlum 0 dB (všechny dílčí útlumové články odepnuty).



Obrázek 3.44 Graf průběhu změřeného *PSV* na vstupu a výstupu attenuátoru v závislosti na kmitočtu pro nastavený útlum 55 dB (všechny dílčí útlumové články připnuty).

Naměřené hodnoty *PSV* se shodují s údaji výrobce. Průběhy v předchozích grafech byly měřeny v laboratoři UREL vektorovým obvodovým analyzátozem Rohde & Schwarz ZVL.



Obrázek 3.45 Zapojený atenuátor API Weinschel 3406-55.

Atenuátor bude umístěn ve skříní pro monitorovací stanici na DIN liště. Na spodní straně je atenuátor osazen deskou z hliníkového plechu 1 mm s držákem na DIN lištu.

3.5 Ovládání VF jednotky

Návrh ovládací jednotky pro koaxiální přepínače, atenuátor a zesilovač je popsán v kapitole 2.6 Ovládání VF jednotky. V této kapitole bude popsána konstrukce jednotky a nastavení komunikace s PC přes USB.

Schéma ovládací jednotky je uvedeno v příloze B.1 Ovládací jednotka, motivy DPS a osazovací výkresy se nachází v dalších přílohách B.2 až B.5.

Ovládací jednotka je napájena stabilizovaným napětím z napájecího zdroje pro VF jednotku. Na desku je přivedeno napětí 5 V a 3,3 V, a to z důvodu možnosti použití dílčích zařízení s ovládacím napětím 3,3 V.

Dvěma hlavními částmi jsou mikrokontroler ATmega 165PA a převodník USART na USB, ty jsou propojeny RX/TX párem.

Mikrokontrolér je napájen přes tlumivku 1 μ H a trojici keramických kondenzátorů na vstupu. Pomocí zkratovací propojky (jumperu) označené jako PWR_MCU lze volit napájecí napětí 5 V a 3,3 V, umístění propojky je vidět na obrázku 3.46. Ovládací jednotka je vybavena resetovacím tlačítkem pro mikrokontrolér. Jako zdroj hodinového signálu byl použit krystalový oscilátor 16 MHz.

Programování mikrokontroléru probíhá pomocí ISP programátoru, který se připojuje k ovládací jednotce přes SPI rozhraní – piny 1 až 3 portu B (SCK, MOSI a MISO). Tyto signály jsou vyvedeny na konektor pro ploché kabely 2 \times 3 piny.

Pro ovládání jednotlivých dílčích zařízení jsou použity porty PA, PB, PC, PE a PF:

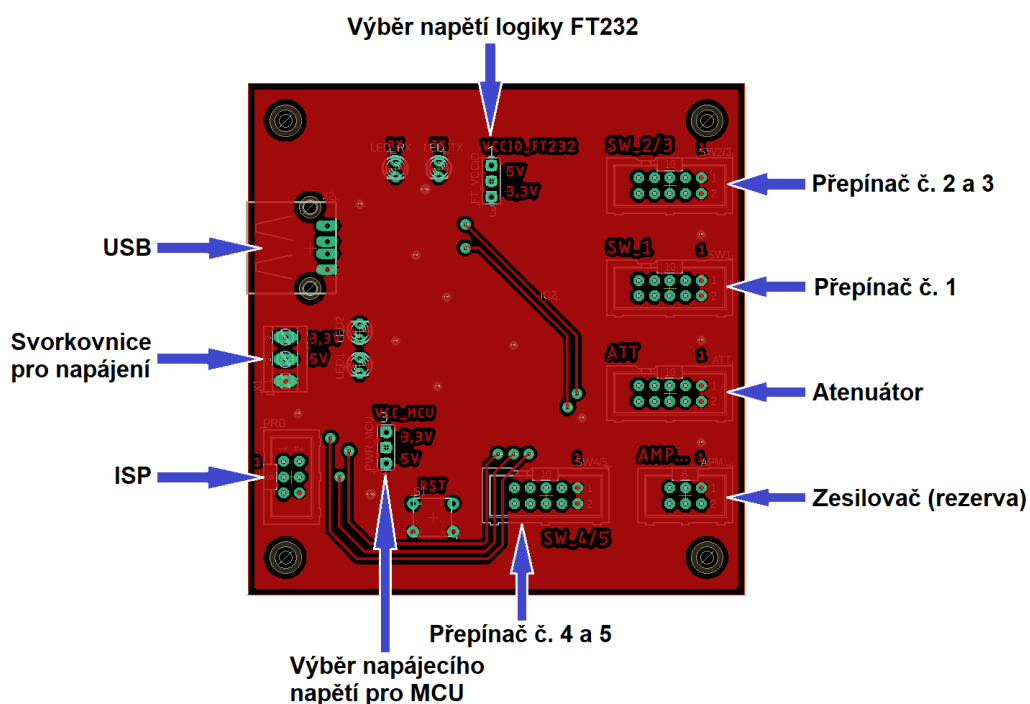
- Port A – Koaxiální přepínač č. 1:
 - PA3 – ovládací vstup portu 1 koaxiálního přepínače.
 - PA4 – ovládací vstup portu 2 koaxiálního přepínače.
 - PA5 – ovládací vstup portu 4 koaxiálního přepínače.
 - PA6 – ovládací vstup portu 3 koaxiálního přepínače.

- Port B – Koaxiální přepínač č. 4 a 5:
 - PB1 – ovládací vstupy portů 3 koaxiálních přepínačů.
 - PB2 – ovládací vstupy portů 4 koaxiálních přepínačů.
 - PB3 – ovládací vstupy portů 2 koaxiálních přepínačů.
 - PB4 – ovládací vstupy portů 1 koaxiálních přepínačů.
- Port C – Koaxiální přepínač č. 2 a 3:
 - PC2 – ovládací vstupy portů 5 koaxiálních přepínačů.
 - PC3 – ovládací vstupy portů 4 koaxiálních přepínačů.
 - PC4 – ovládací vstupy portů 3 koaxiálních přepínačů.
 - PC5 – ovládací vstupy portů 2 koaxiálních přepínačů.
 - PC6 – ovládací vstupy portů 1 koaxiálních přepínačů.
 - PC7 – ovládací vstupy portů 6 koaxiálních přepínačů.
- Port E – Spínání napájení zesilovače a rezerva:
 - PE3 – spínač napájení zesilovače.
 - PE4 až PE7 – rezerva.
- Port F – Atenuátor
 - A0 – první dílčí útlumový článek 1 dB.
 - A1 – druhý dílčí útlumový článek 2 dB.
 - A2 – třetí dílčí útlumový článek 4 dB.
 - A3 – čtvrtý dílčí útlumový článek 8 dB.
 - A4 – pátý dílčí útlumový článek 16 dB.
 - A5 – šestý dílčí útlumový článek 24 dB.

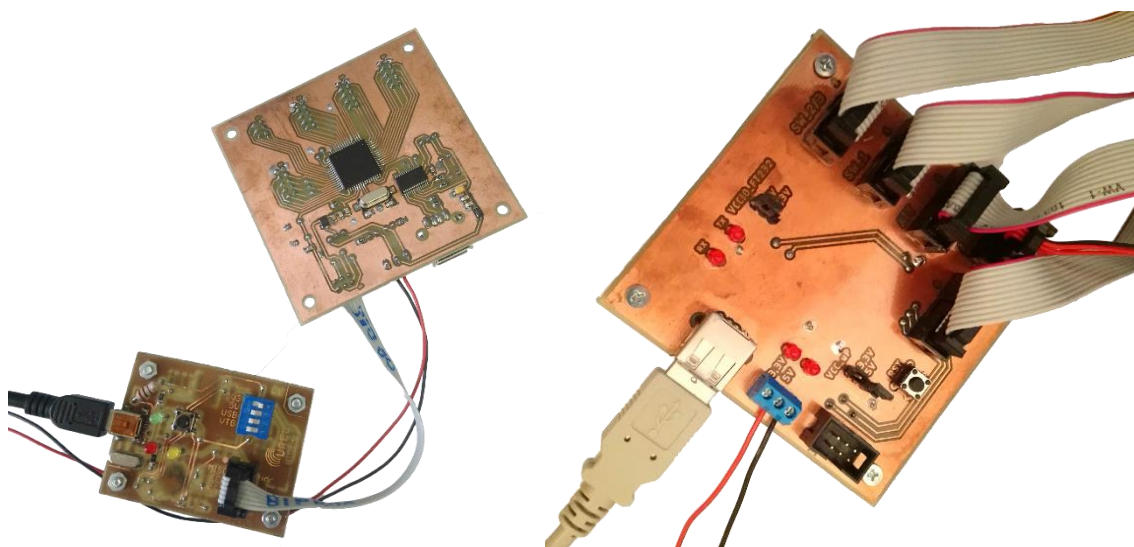
Všechny tyto signály jsou vyvedeny na konektory pro plochý kabel 2×5 pinů nebo 2×3 piny, viz obrázek 3.46.

Převodník USART na USB FT232RL byl zapojen dle doporučení uvedeném v datovém listu (samostatné napájení). Převodník je vždy napájen napětím 5 V. Výrobce udává rozsah 4 – 5,25 V pro případ použití interního oscilátoru. V případě změny napájení mikrokontroléru z 5 V na 3,3 V je také třeba změnit hodnotu napětí na vstupu VCCIO, který určuje, s jakou logickou úrovní se bude pracovat. K tomu je určena druhá zkratovací propojka FT_VCCIO, viz obrázek 3.46. K převodníku jsou připojené dvě LED, jedna pro indikaci příjmu a druhá pro indikaci vysílání.

Pro propojení s PC je použit USB A konektor, pro napájení svorkovnice se třemi kontakty. Přítomnost napájecích napětí indikují dvě LED. Celková konstrukce ovládací jednotky i s programátorem je vidět na obrázku 3.47.



Obrázek 3.46 Horní strana DPS ovládací jednotky s popisem konektorů.



Obrázek 3.47 Zapojená ovládací jednotka pro VF jednotku (vpravo) a jednotka s programátorem (vlevo).

Ovládací jednotka je ze spodní strany upevněna pomocí čtyř distančních sloupků k desce z 1 mm hliníkového plechu s držákem na DIN lištu.

Ovládání dílčích zařízení probíhá pomocí sady příkazů, kdy jednotlivé příkazy spínají konkrétní port koaxiálního přepínače nebo nastavují útlum atenuátoru. Kompletní seznam příkazů je uveden v příloze B.7 Seznam příkazů pro ovládání VF jednotky. Tyto

příkazy lze zadávat přímo do terminálu nebo využít grafické uživatelské rozhraní v monitorovacím softwaru, kde budou tyto příkazy implementovány, viz kapitola 3.8.3 Monitorovací software.

Ovládací jednotka s převodníkem FT232RL se po připojení k PC jeví jako virtuální sériový port (po nainstalování ovladačů). Poté se lze připojit pomocí terminálového programu a odesílat příkazy ovládací jednotce.

K ovládání slouží jednoduché textové příkazy:

- ANT1 – ANT4, ANTOFF: výběr antény.
- FILT1 – FILT6, FILTOFF: výběr filtru.
- AA1 – AA4, AAOFF: výběr atenuátoru nebo zesilovače¹⁾
- SETATTxx: nastavení hodnoty útlumu atenuátoru
- Každý příkaz musí být ukončen znakem CR (“\r”) nebo LF (“\n”).

¹⁾ Jakmile jsou vybrány porty koaxiálního přepínače, mezi kterými je připojen zesilovač, je současně zapnuto napájení zesilovače.

Po úspěšném přijetí příkazů je ten samý příkaz poslán zpět a zobrazen v terminálu. V případě zadání neplatného příkazu je vypsána chybová hláška “Invalid Argument”. Základní nastavení pro komunikaci s PC je uvedeno v tabulce 3.6.

Tabulka 3.6 Základní nastavení komunikace ovládací jednotka – PC.

Přenosová rychlost	9600 Bd
Datové bity	8
Stop bity	1
Parita	Žádná

Kód pro komunikaci s PC vytvořený v jazyce C je součástí elektronické přílohy a zde bude pouze ve stručnosti popsán.

Obslužný program se skládá z několika funkcí. První z funkcí **usart_init** nastavuje základní parametry asynchronní komunikace uvedené v tabulce 3.6, povoluje příjem i vysílání a přerušení od přijímače. Funkce **usart_rx** slouží k příjmu a vrací přijatá data. Funkce **usart_tx** a **usart_string_tx** slouží k odesílání řetězců.

Příjem příkazů je prováděn jako příjem textu s přerušením. V obslužné rutině přerušení **ISR(USART0_RX_vect)** dochází k postupnému zpracování přijímaných znaků. Délka zprávy je omezena na 9 znaků a po překročení tohoto počtu je příkaz brán jako neplatný. Platný příkaz musí být vždy ukončen znakem \n nebo \r. Takto přijatý řetězec je následně uložen do proměnné **zprava**. Pro práci s řetězcí jsou zde použity funkce **strncpy()** – kopírování řetězců a **strcmp()** – porovnávání řetězců z hlavičkového souboru **string.h**.

Tato přijatá zpráva je poté porovnávána v hlavní smyčce a pokud dojde ke shodě, je přiřazena vysoká úroveň na pin, který ovládá zvolený vstup zařízení.

Není možné získat žádnou zpětnou vazbu od dílčích zařízení, zdali byla požadovaná operace provedena (zdali byl koaxiální přepínač přepnut do požadované polohy nebo byla na atenuátoru nastavena požadovaná hodnota útlumu). Proto je příkaz poslán zpět,

jakmile dojde k jeho správnému přijetí a byl zadán správně.

Pro odesílání řetězců je využito funkce **printf_P**, ta umožňuje, aby mohl být formátovací řetězec čten přímo z paměti flash (úspora RAM). K obsluze flash paměti je použit hlavičkový soubor **avr/pgmspace.h**. Ten mimo jiné obsahuje makro **PSTR()**, které zjistí ukazatel na řetězec v paměti flash. Všechny řetězce z flash paměti se předávají funkcím skrze toto makro. Funkci **printf** je nastaven standardní výstup jako funkce pro odesílání **usart_string_tx**.

Tento kód zabírá ve flash paměti 14 kB. Pro testování komunikace byl použit volně dostupný terminálový program HyperSerialPort (staženo z [24]). Po odladění programu byla úspěšně ověřena funkce všech příkazů.

3.6 Napájení

Požadavky na napájecí zdroj byly ve stručnosti uvedeny v kapitole 2.7 Napájení. V této kapitole bude popsán návrh napájecího zdroje, a to na základě konkrétních dílčích zařízení, které byly vybrány.

V následující tabulce 3.7 jsou ještě jednou uvedeny požadované parametry jednotlivých napájecích větví spolu s dílčími zařízeními, které budou napájet.

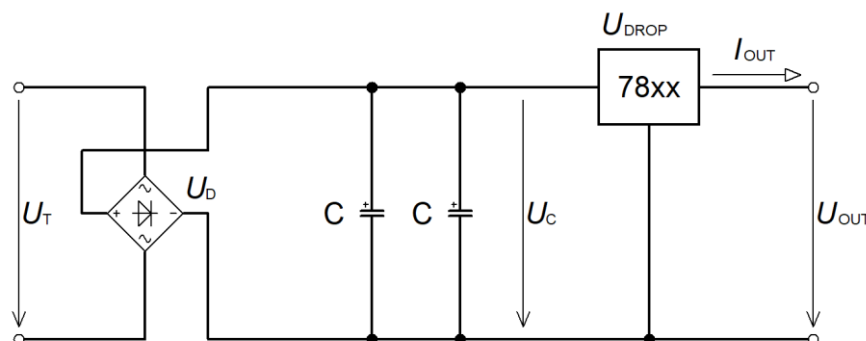
Tabulka 3.7 Požadované parametry jednotlivých napájecích větví podle použitých zařízení.

Zařízení	Parametry napájecích větví	
	Napětí [V]	Proud [A]
Koaxiální přepínač Teledyne CCR-38S16O-TD – 2 kusy: 28 V/ 140 mA Koaxiální přepínač TEleRel TR04-N28S181-D – 3 kusy: 28 V/ 130 mA	28	1
Rotátor YAESU G-800/G-1000: 24 V/ 2 A	24	2,5
Aktivní antény (bez konkrétní volby)	24	0,5
Atenuátor API Weinschel 3406-55: 9 – 13 V/150 mA Univerzální ovládací jednotka EA4TX ARS-USB: 12 V/ 160 mA Ventilátor 80 × 80 × 25 mm: 12 V/ 100 mA	12	0,5
Ovládací jednotka s převodníkem USB Zesilovač Mini-Circuits ZX60-V63+: 5 V/ 69 mA	5	1
Přídavné napájecí zdroje (moduly)		
Ovládací jednotka s převodníkem USB Zesilovač Mini-Circuits ZX60-V63+: 5 V/ 69 mA	5	0,5
Koaxiální přepínač ve formě IO Analog Devices ADRF 5040	±3,3	0,1

Návrh zdroje bude rozdělen do jednotlivých částí, postupně od lineárních stabilizátorů až ke transformátoru. Schéma napájecího zdroje je uvedeno v příloze A.1 Zdroj 5 V, 12 V, 24 V a 28 V, motivy DPS a osazovací výkresy v dalších přílohách A.2 až A.4. Na obrázku 3.48 je zjednodušené schéma jedné napájecí větve zdroje s označením jednotlivých napětí.

Při návrhu byl využit spice simulační software LTspice [7]. V tomto softwaru byly

simulovány všechny větve napájecího zdroje. Výsledky těchto simulací zde nejsou uváděny z důvodu nárůstu objemu práce. Na konci kapitoly je pouze slovně zhodnocena funkčnost zdroje, která byla ověřena měřením, toto měření je porovnáno se simulacemi v LTspice.



Obrázek 3.48 Zjednodušené schéma napájecí větve zdroje s lineárním stabilizátorem.

Lineární stabilizátory napětí:

Větev 24 V/ 2,5 A:

Tato napájecí větev je bez lineárního stabilizátoru napětí.

Větev 28 V/ 1 A:

Pro tuto napájecí větev je použit nastavitelný lineární stabilizátor napětí LM338T (TO-220) s následujícími parametry:

- Maximální rozdíl vstupního a výstupního napětí je 40 V.
- Minimální rozdíl vstupního a výstupního napětí je $U_{\text{DROP}} = 3 \text{ V}$.
- Výstupní napětí je v rozsahu 1,2 až 32 V.
- Maximální výstupní proud $I_{\text{OUT}} = 5 \text{ A}$.

Větev 5 V/ 1 A:

Pro tuto napájecí větev je použit lineární stabilizátor napětí MC7805ABTG (TO-220) s následujícími parametry:

- Maximální vstupní napětí $U_C = 35 \text{ V}$.
- Úbytek napětí na stabilizátoru $U_{\text{DROP}} = 2 \text{ V @ } I_{\text{OUT}} = 1 \text{ A}$.
- Maximální výstupní proud $I_{\text{OUT}} = 1 \text{ A}$.

Větev 24 V/ 0,5 A:

Pro tuto napájecí větev je použit lineární stabilizátor napětí MC78M24BTG (TO-220) s následujícími parametry:

- Maximální vstupní napětí $U_C = 40 \text{ V}$.
- Úbytek napětí na stabilizátoru $U_{\text{DROP}} = 2 \text{ V}$.
- Maximální výstupní proud $I_{\text{OUT}} = 0,5 \text{ A}$.

Větev 12 V/ 0,5 A:

Pro tuto napájecí větev je použit lineární stabilizátor napětí MC78M12BTG

(TO-220) s následujícími parametry:

- Maximální vstupní napětí $U_C = 35 \text{ V}$.
- Úbytek napětí na stabilizátoru $U_{\text{DROP}} = 2 \text{ V}$.
- Maximální výstupní proud $I_{\text{OUT}} = 0,5 \text{ A}$.

Výstupní filtry:

Výstupní filtr se skládá z několika elektrolytických kondenzátorů, ty byly voleny vždy ve verzi low ESR (s nízkým ekvivalentním sériovým odporem).

Větev 24 V/ 2,5 A:

- $2 \times 4700 \mu\text{F}/35 \text{ V}$
- $U_C = 26,5 \text{ V}/23,6 \text{ V}$ (špičková hodnota, naprázdno/při zatížení)

Větev 28 V/ 1 A:

- $2 \times 2200 \mu\text{F}/50 \text{ V}$
- $U_C = 35,7 \text{ V}/32,0 \text{ V}$ (špičková hodnota, naprázdno/při zatížení)

Větev 5 V/ 1 A:

- $3 \times 2200 \mu\text{F}/16 \text{ V}$
- $U_C = 9,8 \text{ V}/8,0 \text{ V}$ (špičková hodnota, naprázdno/při zatížení)

Větev 24 V/ 0,5 A:

- $2 \times 2200 \mu\text{F}/35 \text{ V}$
- $U_C = 29,0 \text{ V}/26,6 \text{ V}$ (špičková hodnota, naprázdno/při zatížení)

Větev 12 V/ 0,5 A:

- $2 \times 2200 \mu\text{F}/25 \text{ V}$
- $U_C = 17,8 \text{ V}/15,3 \text{ V}$ (špičková hodnota, naprázdno/při zatížení)

Usměrňovače:

Usměrňovače jsou použity můstkového typu. Při výběru byly klíčovými parametry výstupní proud, úbytek napětí, který by měl být co nejmenší a maximální závěrné napětí, a to by mělo být minimálně dvojnásobek špičkové hodnoty vstupního napětí.

Větev 24 V/ 2,5 A:

Můstkový usměrňovač MC78M24BTG s následujícími parametry:

- Napětí v propustném směru $U_D = 0,95 \text{ V @ } 2,5 \text{ A}$.
- Maximální napětí v závěrném směru je 1000 V .
- Maximální proud v propustném směru je 3 A .

Větev 28 V/ 1 A a 5 V/ 1 A:

Můstkový usměrňovač DB153G s následujícími parametry:

- Napětí v propustném směru $U_D = 0,95 \text{ V @ } 1 \text{ A}$.
- Maximální napětí v závěrném směru je 200 V .
- Maximální proud v propustném směru je $1,5 \text{ A}$.

Větev 24 V/ 0,5 A a 12 V/ 0,5 A:

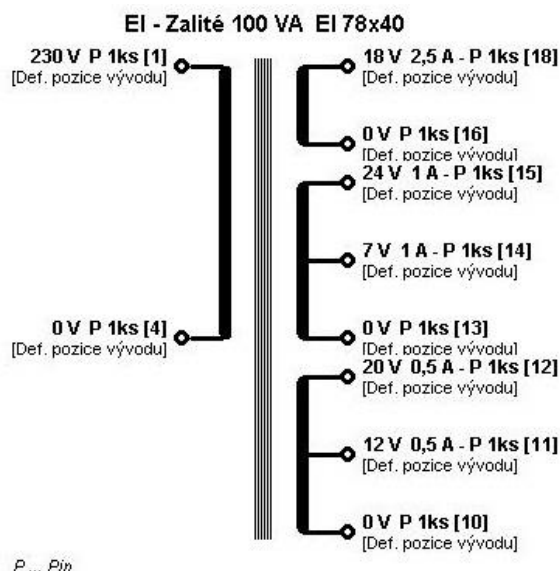
Můstkový usměrňovač DB103G s následujícími parametry:

- Napětí v propustném směru $U_D = 0,85 \text{ V @ } 0,5 \text{ A}$.
- Maximální napětí v závěrném směru je 200 V.
- Maximální proud v propustném směru je 1 A.

Transformátor:

Transformátor byl vyroben na míru dle požadavků vyplývajících z předešlého návrhu specializovanou firmou. Při návrhu byly brány v úvahu parametry usměrňovačů a stabilizátorů, a to především úbytky napětí, a ještě zde byla přidána rezerva 10 % (napětí).

Koncepce transformátoru byla zvolena se třemi sekundárními vinutími a u dvou vinutí byly navrženy odbočky. Schéma tohoto transformátoru je vidět na obrázku 3.49.



Obrázek 3.49 Schéma navrhovaného transformátoru s parametry jednotlivých vinutí a odboček, poskytnuto výrobcem [25].

Celkové parametry transformátoru jsou uvedeny v následující tabulce 3.8.

Tabulka 3.8 Parametry transformátoru vyrobeného na zakázku.

Sekundární vinutí	Napětí naprázdno [V]	Napětí při zatížení [V]
Vývody 18 a 16	19,4	18
Vývody 15 a 13	25,9	24
Vývody 15 a 14 (odbočka)	7,6	7
Vývody 12 a 10	21,1	20
Vývody 12 a 11 (odbočka)	13,2	12
Primární vinutí		
Vývody 1 a 4	230 V/50 – 60 Hz, pojistka: T0,5 A	

Max. teplota okolí	40°
Maximální oteplení	48°
Celkový výkon	92 VA

Transformátor je z EI plechů zalitý s piny do plošného spoje o rozměrech 78 × 40 mm a je opatřen ještě úchyty pro šrouby M3. Vyrobený a osazený transformátor je vidět na obrázku 3.51.

Zdroj ±3,3 V:

Tento napájecí zdroj byl vyroben pro možné použití koaxiálních přepínačů nebo atenuátoru ve formě IO, které většinou vyžadují symetrické napájecí napětí 3,3 V.

Zdroj byl navržen jako modul 50 × 25 mm upevněný na desce zdroje s více napájecími větvemi pomocí čtyř distančních sloupků M2,5. Schéma, motivy DPS a osazovací výkres jsou uvedeny v přílohách A.9 až A.12 Zdroj ±3,3 V.

Pro tento zdroj je použit modulární DC-DC měnič NTA0505MC, jehož parametry jsou:

- Vstupní napětí je 5 V.
- Výstupní napětí je ±5 V.
- Maximální výstupní proud je ±100 mA.
- SMD pouzdro.

Každá výstupní větev je pak opatřena lineárním stabilizátorem napětí pro dosažení požadovaného výstupního napětí + 3,3 V a -3,3 V.

Kladná větev XC6206P332MR-G:

- Maximální vstupní napětí je 6 V.
- Úbytek napětí na stabilizátoru typ. 250 mV, max. 350 mV.
- Maximální výstupní proud je 200 mA.
- SMD pouzdro SOT-23-3.

Záporná větev XC6902N331MR-G:

- Maximální vstupní napětí je -2,4 V.
- Úbytek napětí na stabilizátoru typ. 102 mV, max. 142 mV.
- Maximální výstupní proud je -200 mA.
- SMD pouzdro SOT-23-3.

Pro připojení vstupního napětí 5 V je zdroj vybaven konektorem se zámkem a na výstupu je osazena svorkovnice se třemi kontakty. Výhodou tohoto zdroje je, že ho lze zatěžovat i nesymetricky a je ho proto možné použít i pro napájení ovládací jednotky napětím 3,3 V.

Zdroj 5 V:

Jelikož byl zdroj z velké části navrhován ještě před výběrem konkrétních zařízení, tak po jeho realizaci bylo zjištěno, že koncepce s odbočkami vinutí není zcela vhodná. Při použití vinutí s odbočkou musí být země obou větví vycházejících z odboček odděleny. To při použití dílčích zařízení, kdy je zem spojena s kovovým krytem nebo VF vedením, není dodrženo. Tento problém nastal u větví 28 V a 5 V, kdy jejich země nesmí

být spojeny, jinak by se změnili napěťové poměry na jednotlivých součástkách. Země větví, které vychází z jiného vinutí mohou být spojeny. Z tohoto důvodu musel být zdroj doplněn o modul se stabilizátorem 5 V, který je připojen na větev 12 V.

Tento zdroj byl navržen jako modul 50×25 mm upevněný na desce zdroje s více napájecími větvemi pomocí čtyř distančních sloupků M2,5 a lze ho umístit nad modul zdroje $\pm 3,3$ V. Schéma, motivy DPS a osazovací výkres jsou uvedeny v přílohách A.5 až A.8 Zdroj 5 V.

Tento modul obsahuje pouze lineární stabilizátor napětí MC78M05 (TO220) s následujícími parametry:

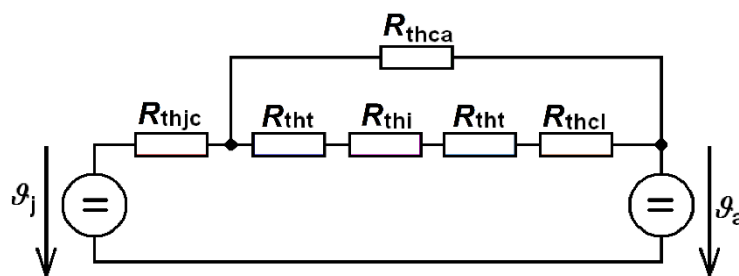
- Maximální vstupní napětí je 35 V.
- Úbytek napětí na stabilizátoru je 2 V.
- Maximální výstupní proud je 0,5 A.

Pro připojení vstupního napětí 12 V je zdroj vybaven konektorem se zámkem a na výstupu je osazena svorkovnice.

Chlazení:

Montáž přídatného chladiče vyžadovaly stabilizátory napětí v pouzdře TO-220 a usměrňovač pro větev 24 V/ 2,5 A. Na následujícím obrázku 3.50 je vidět náhradní schéma tepelného odporu systému s přídatným chladičem, kde:

- R_{thjc} – je tepelný odpor rozhraní polovodičový přechod pouzdro součástky.
- R_{thca} – je tepelný odpor rozhraní pouzdro součástky okolí.
- R_{tht} – je tepelný odpor rozhraní podložka a chladič/pouzdro součástky.
- R_{thi} – je tepelný odpor podložky.
- R_{thcl} – je tepelný odpor chladiče.



Obrázek 3.50 Náhradní schéma tepelného odporu systému s přídatným chladičem.

Nejprve bylo potřeba ověřit, zdali je nutné použít přídatný chladič, nebo je součástka schopna tepelný výkon rozptýlit do okolí sama. Pro tento případ se zanedbá větev s chladičem a uvažuje se jen tepelný odpor R_{thjc} a R_{thca} nebo jejich součet R_{thja} . Dále je nutné znát maximální teplotu přechodu $\theta_{j \max}$ (datový list součástky) a teplotu okolí θ_a . Maximální ztrátový výkon pro použití bez chladiče se vypočítá jako

$$P_{\text{MAX}} = \frac{\theta_{j \max} - \theta_a}{R_{thja}}, \quad (3.1)$$

pokud je ztrátový výkon větší než maximální tepelný výkon co je součástka schopna

vyzářit, je třeba vypočítat hodnotu tepelného odporu přídavného chladiče jako

$$R_{thcl} \frac{\vartheta_{j\max} - \vartheta_a}{P_{DROP}} = (R_{thjc} + R_{tht(1)} + R_{thi} + R_{tht(2)}) . \quad (3.2)$$

Podle hodnoty tepelného odporu byl následně vybrán chladič. Pro konkrétní součástky je zde uvedena už jen vypočítaná hodnota tepelného odporu chladiče a údaje nutné pro její výpočet.

Tepelný odpor izolační slídkové podložky pod stabilizátory (TO-220) je 1,2 K/W a tepelný odpor rozhraní (suché) izolační podložka a pouzdro/chladič je 0,8 – 1,2 K/W. Tepelný odpor rozhraní (suché) pouzdro a chladič je 0,2 – 0,3 K/W.

Usměrňovač pro větev 24 V/ 2,5 A:

- Maximální ztrátový výkon $P_{DROP} = 4,8 \text{ W}$
- Tepelný odpor polovodičový přechod okolí $R_{thja} = 55 \text{ °C/W}$
- Maximální tepelný výkon, který je součástka sama schopna rozptýlit do okolí $P_{MAX} = 2,1 \text{ W @ } \vartheta_a = 25 \text{ °C}$
- $P_{MAX} = 1,6 \text{ W @ } \vartheta_a = 50 \text{ °C}$
- Maximální teplota polovodičového přechodu $\vartheta_{j\max} = 140 \text{ °C}$
- Tepelný odpor rozhraní polovodičový přechod pouzdro součástky $R_{thjc} = 1,5 \text{ °C/W}$
- Maximální tepelný odpor chladiče $R_{thcl} = 22,4 \text{ °C/W @ } \vartheta_a = 25 \text{ °C}$
- $R_{thcl} = 17,1 \text{ °C/W @ } \vartheta_a = 50 \text{ °C}$

Stabilizátor pro větev 28 V/ 1 A:

- $P_{DROP} = 4,0 \text{ W}$
- $R_{thja} = 22,9 \text{ °C/W}$
- $P_{MAX} = 4,4 \text{ W @ } \vartheta_a = 25 \text{ °C}$
- $P_{MAX} = 3,3 \text{ W @ } \vartheta_a = 50 \text{ °C}$
- $\vartheta_{j\max} = 125 \text{ °C}$
- $R_{thjc} = 0,7 \text{ °C/W}$
- Nevyžaduje přídavný chladič @ $\vartheta_a = 25 \text{ °C}$
- $R_{thcl} = 14,3 \text{ °C/W @ } \vartheta_a = 50 \text{ °C}$

Stabilizátor pro větev 5 V/ 1 A:

- $P_{DROP} = 3,0 \text{ W}$
- $R_{thja} = 65 \text{ °C/W}$
- $P_{MAX} = 1,5 \text{ W @ } \vartheta_a = 25 \text{ °C}$
- $P_{MAX} = 1,2 \text{ W @ } \vartheta_a = 50 \text{ °C}$
- $\vartheta_{j\max} = 125 \text{ °C}$
- $R_{thjc} = 5 \text{ °C/W}$
- $R_{thcl} = 24,7 \text{ °C/W @ } \vartheta_a = 25 \text{ °C}$
- $R_{thcl} = 16,4 \text{ °C/W @ } \vartheta_a = 50 \text{ °C}$

Stabilizátor pro větev 24 V/ 0,5 A:

- $P_{\text{DROP}} = 1,3 \text{ W}$
- $R_{\text{thja}} = 70 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$
- $P_{\text{MAX}} = 1,4 \text{ W @ } \vartheta_a = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- $P_{\text{MAX}} = 1,1 \text{ W @ } \vartheta_a = 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- $\vartheta_{j \text{ max}} = 125 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- $R_{\text{thjc}} = 5 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$
- Nevyžaduje přídavný chladič @ $\vartheta_a = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- $R_{\text{thcl}} = 49,4 \text{ }^{\circ}\text{C/W @ } \vartheta_a = 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Stabilizátor pro větev 12 V/ 0,5 A:

- $P_{\text{DROP}} = 1,6 \text{ W}$
- $R_{\text{thja}} = 70 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$
- $P_{\text{MAX}} = 1,4 \text{ W @ } \vartheta_a = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- $P_{\text{MAX}} = 1,1 \text{ W @ } \vartheta_a = 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- $\vartheta_{j \text{ max}} = 125 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- $R_{\text{thjc}} = 5 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$
- $R_{\text{thcl}} = 52,6 \text{ }^{\circ}\text{C/W @ } \vartheta_a = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- $R_{\text{thcl}} = 37,3 \text{ }^{\circ}\text{C/W @ } \vartheta_a = 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Stabilizátor pro zdroj 5 V/ 0,5 A:

- $P_{\text{DROP}} = 3,5 \text{ W}$
- $R_{\text{thja}} = 70 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$
- $P_{\text{MAX}} = 1,4 \text{ W @ } \vartheta_a = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- $P_{\text{MAX}} = 1,1 \text{ W @ } \vartheta_a = 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- $\vartheta_{j \text{ max}} = 125 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- $R_{\text{thjc}} = 5 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$
- $R_{\text{thcl}} = 20,0 \text{ }^{\circ}\text{C/W @ } \vartheta_a = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- $R_{\text{thcl}} = 12,8 \text{ }^{\circ}\text{C/W @ } \vartheta_a = 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Maximální tepelný odpor chladiče byl vypočítán pro dvě hodnoty teploty okolí $\vartheta_a = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a $\vartheta_a = 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Vzhledem k tomu, že bude monitorovací stanice použita ve vnitřním i venkovním prostředí, kde na ní budou působit klimatické vlivy (nízké i vysoké teploty), bude zdroj vybaven běžnými přídavnými chladiči a poté ještě přídavnými chladiči pro tepelné spojení s krabicí zdroje.

Krabice zdroje je vyrobena z hliníkového plechu 1 mm a může sloužit také jako chladič. Pro tuto krabici byl dle přibližných vztahů převzatých z [26] vypočítán její tepelný odpor. Celková plocha krabice je 98338 mm^2 . Tepelný odpor lze vypočítat podle tohoto přibližného vztahu pro návrh chladicí desky [26] jako

$$R_{\text{th}} = \frac{3,3}{\sqrt{\lambda \cdot h}} \cdot C^{0,25} + \frac{650}{S} \cdot C, \quad (3.3)$$

kde λ je tepelná vodivost [$\text{W/K}\cdot\text{cm}$], viz tabulka 3.9, h je tloušťka materiálu desky [mm], C je korekční faktor, viz tabulka 3.9 a S je plocha desky [cm^2].

Tabulka 3.9 Hodnoty tepelné vodivosti a korekčního faktoru [26].

Tepelná vodivost	λ [W/K·cm]	Korekční faktor	C [-]
Měď	3,8	Poloha vodorovná, povrch čistý	1
Hliník	2,1	Poloha svislá, povrch čistý	0,85
Mosaz	1,1	Poloha vodorovná, povrch černěn	0,5
Ocel	0,46	Poloha svislá, povrch černěn	0,43

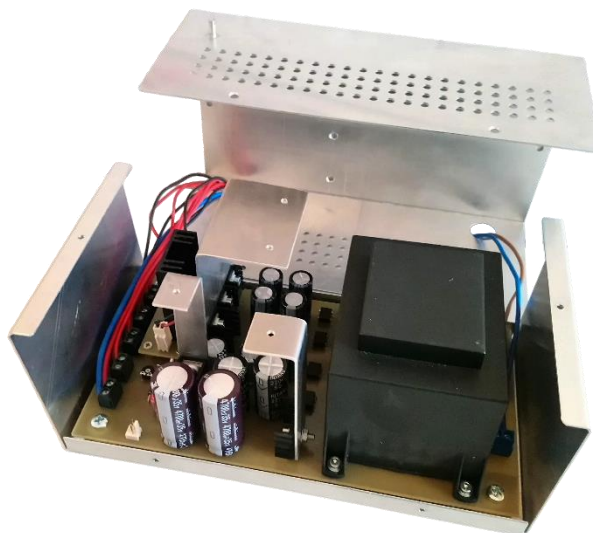
Tepelný odpor krabičky napájecího zdroje je 2,94 K/W. K tomuto účelu byly navrženy přídatné chladiče, které jsou upevněny na pouzdře součástky a na horním krytu krabice zdroje, viz příloha D Mechanické a konstrukční části. Tento systém chlazení by měl být dostačující i při zvýšení teploty okolí.

Konstrukční řešení:

DPS napájecího zdroje je umístěna v krabici z hliníkového plechu 1 mm na čtyř distančních sloupcích M4. Krabice se skládá ze dvou dílů, dno s boky na kratší straně a víko s boky na delší straně. Víko je z bočních stran vybaveno množstvím otvorů o průměru 4 mm umožňující cirkulaci vzduchu a odvod tepla. Pro kabeláž je krabice opatřena dvěma průchodkami, viz obrázek 3.51.

Zdroj v krabici je umístěn v držáku navrženém dle rozměrů krabice a zajištěn přepážkou z čelní strany a dorazy zezadu, viz kapitola 3.9 Celková konstrukce zařízení.

Pro připojení kabeláže slouží šroubovací svorkovnice. Pojistka pro transformátor je vyvedena na konektorovou desku na spodní straně skříně monitorovací stanice do pojistkového držáku (skleněná pojistka 5 × 20 mm).



Obrázek 3.51 Zapojený napájecí zdroj v krabici.

Výsledné parametry zdroje byly ověřeny měřením a byly potvrzeny výsledky ze simulačního softwaru LTspice. Pro účely měření byly použity umělé zátěže.

Rozvod napájení a kabeláž:

Jednotlivá výstupní napětí ze zdroje jsou přivedena na svorkovnice umístěné na jedné desce, která je vidět na obrázku 3.56 v kapitole 3.9 Celková konstrukce zařízení. Pro rozvod napájení byla použita kabeláž uvedená v tabulce 3.10.

Pro výstup 24 V/2,5 A (napájení rotátoru) je použita svorkovnice WAGO 255-743, výstup zdroje je na tuto svorkovnici připojen přes pojistku F2,5 A v pojistkovém držáku pro skleněné pojistky 5 × 20 mm do DPS.

Pro ostatní výstupy zdroje jsou použity svorkovnice WAGO 234-503 nebo 234-508. Schéma je uvedeno v příloze A.13 Svorkovnice, motivy DPS a osazovací výkresy v dalších přílohách A.14 a A.15.

Tabulka 3.10 Použitá kabeláž a její parametry.

Kabel	Průřez [mm ²]/AWG	Použití
Lanko Cu s PVC izolací modré a červené	1,0/17	Napájení motoru rotátoru (propojení zdroje a svorkovnice)
Lanko Cu s PVC izolací černé, červené, modré a hnědé	0,5/20	Připojení do sítě 230 V, propojení zdroje se svorkovnicemi a ostatní signály pro rotátor
Lanko Cu s PVC izolací černé a červené	0,25/23	Připojení napájení dílčích zařízení

Napájení celé monitorovací stanice:

Celá stanice je napájena ze sítě 230 V a pro případ výpadku dodávek energie bude vybavena záložním zdrojem o výkonu minimálně 300 W. Ze sítě je přímo napájen PC (přes záložní zdroj), který pak napájí přes USB spektrální analyzátor Signal Hound. Pro připojení napájení ze sítě je na konektorové desce osazena IEC zásuvka s vypínačem a EMI filtrem, viz kapitola 3.9 Celková konstrukce zařízení.

3.7 Rotátor a jeho ovládání

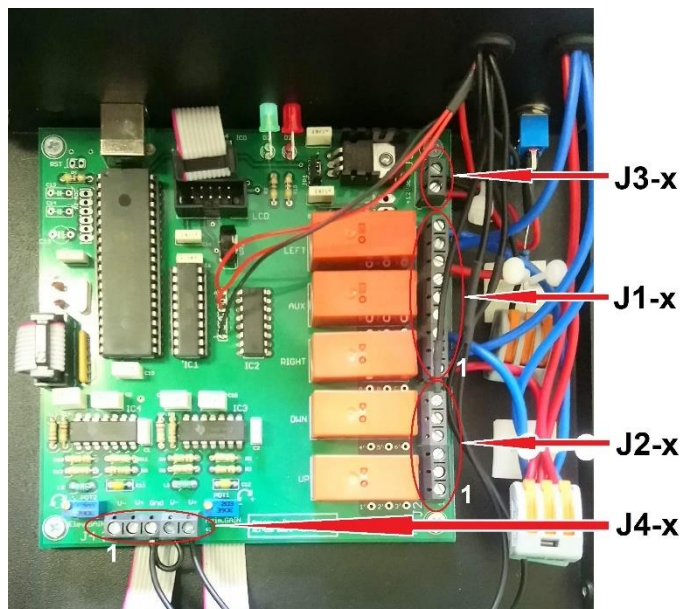
V kapitole 2.5 Rotátor byla popsána funkce rotátoru a uvedeny typy, které by bylo možné použít. Bylo zde popsáno ovládání přes PC spolu s vybranou univerzální ovládací jednotkou ARS-USB.

U této jednotky bude využita pouze její část pro ovládání azimutálního rotátoru (jednotka obsahuje i část pro ovládání elevačního rotátoru – možnost kombinace obou). Rotátor je také možné pomocí této jednotky ovládat tlačítky umístěnými na čelním panelu spolu s LCD displejem. Tato možnost nebude využita, proto je LDC displej odpojen z důvodu snížení odběru.

Jednotka je umístěna v držáku navrženém dle rozměrů její krabice a zajištěna přepážkou z čelní strany a dorazy zezadu, viz kapitola 3.9 Celková konstrukce zařízení. K jednotce je ze svorkovnice s napájecími napětími přivedeno 12 V pro vlastní napájení a 24 V pro napájení rotátoru.

V této kapitole bude popsáno zapojení jednotky a samotné ovládání rotátoru. Na následujícím obrázku 3.52 je vidět vnitřek ovládací jednotky s označením jednotlivých

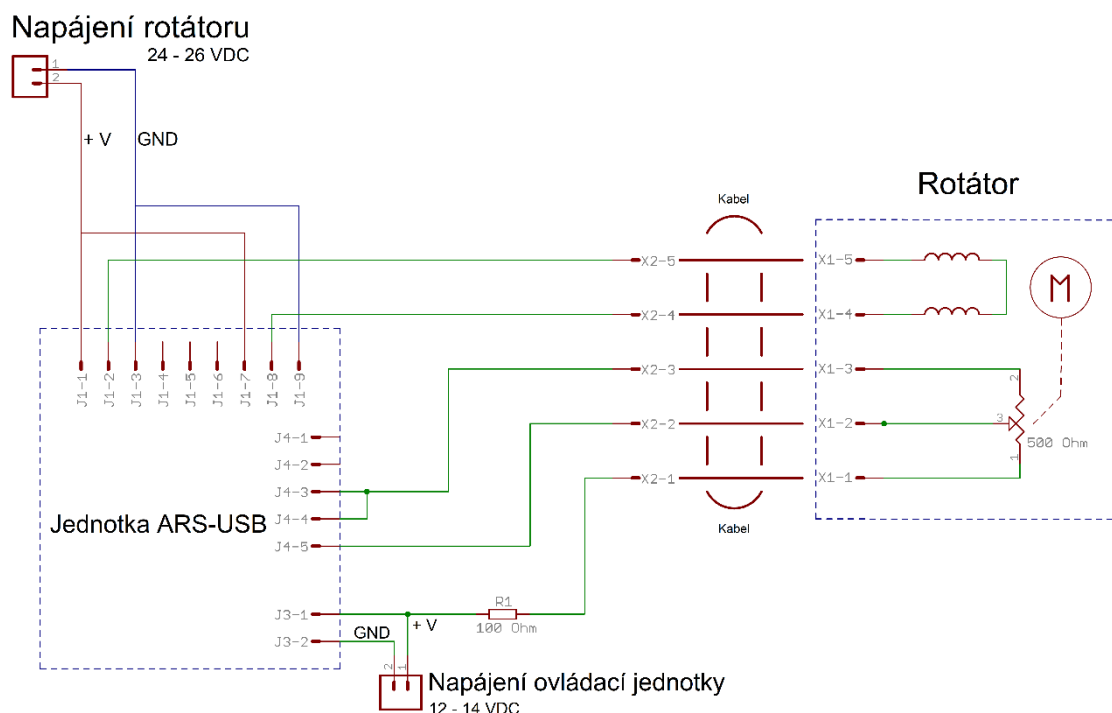
svorkovnic pro připojení rotátoru a v tabulce 3.11 je jejich popis. Na dalším obrázku 3.53 je schéma připojení rotátoru YAESU k ARS-USB. Použit bude rotátor YAESU G-800 nebo G-1000 ve verzi DXC nebo DXA.



Obrázek 3.52 Umístění a popis svorkovnic na DPS uvnitř krabice ovládací jednotky pro připojení rotátoru.

Tabulka 3.11 Popis jednotlivých kontaktů svorkovnic ovládací jednotky.

Svorkovnice – číslo kontaktu	Funkce	
J1-1	Otáčení vpravo/po směru hodinových ručiček. Sepnuto (otáčení): J1-2 na J1-3 Vypnuto: J1-2 na J1-1	
J1-2		
J1-3		
J1-4	Přídavné relé, může sloužit k ovládání brzdy u větších rotátorů (G-2800) Sepnuto: J1-5 na J1-6 Vypnuto: J1-5 na J1-4	
J1-5		
J1-6		
J1-7	Otáčení vlevo/proti směru hodinových ručiček. Sepnuto (otáčení): J1-8 na J1-9 Vypnuto: J1-8 na J1-7	
J1-8		
J1-9		
J2	Pro elevační rotátor (nahoru/dolu) – nebude využito	
J3	Napájení 12 – 14 VDC	
J4-1	Elevace +	Zpětná vazba od rotátoru o jeho aktuální poloze (napětí)
J4-2	Elevace -	
J4-3	GND	
J4-4	Azimut +	
J4-5	Azimut -	



Obrázek 3.53 Schéma propojení rotátoru YAESU (se stejnosměrným elektromotorem) s ovládací jednotkou ARS-USB, převzato z [15].

Na rotátoru je umístěn sedmipinový šroubovací panelový konektor NJC-207-RM, kde jednotlivé piny jsou zapojeny takto:

- 1 – kladné napětí pro reostat
- 2 – hodnota napětí úměrná poloze rotátoru
- 3 – zem reostatu
- 4 – elektromotor
- 5 – elektromotor
- 6 – brzda, pouze u G-2800
- 7 – nepřipojeno

K propojení rotátoru byl vyroben kabel (10 m), u kterého na straně rotátoru je osazen konektor NJC-207-PF a na straně monitorovací stanice konektor JR16WP-7P(71). Kabel byl použit flexibilní s PVC pláštěm $7 \times 0,5 \text{ mm}^2$ – licna.

Na konektorové desce monitorovací stanice je umístěna panelová zásuvka JR16WR-7S(71), viz kapitola 3.9. Celková konstrukce zařízení, ze které jsou vedeny vodiče až ke svorkovnicím uvnitř ovládací jednotky. Ze svorkovnice J3 je vyvedeno napájení +12 V přes rezistor $100 \Omega / 0,5 \text{ W}$ pro reostat rotátoru. K rozvádění jsou použity svorky WAGO 222-413.

Jednotka je připojena k PC přes USB rozhraní. Její součástí je i nástroj sloužící pro kalibraci rotátoru ARSCONF a software pro ovládání s vizualizací ve 30denní zkušební verzi ARSVCOM. Další možností je ovládání a kalibrace zasíláním příkazů přes terminál, viz příloha B.6 Seznam příkazů pro ovládání rotátoru. V tomto případě bude ovládání

rotátoru sdruženo s ovládáním VF jednotky, a to bude součástí monitorovacího softwaru, viz kapitola 3.8.3 Monitorovací software.

Detailní popis připojení rotátoru k univerzální ovládací jednotce ARS-USB, kalibrace a ovládání jsou uvedeny v návodu na obsluhu monitorovací stanice, který je součástí elektronických příloh.

3.8 Měření, zpracování a zobrazení naměřených dat

V této kapitole bude v krátkosti popsána analýza přijatého a vhodně upraveného signálu. Dále pak i jeho zobrazení a ukládání výsledků.

Vysokofrekvenční signál je přiveden na vstup spektrálního/signálového analyzátoru, který je připojen k PC s monitorovacím softwarem. V této kombinaci je možné provádět tyto operace:

- Zobrazení spektra signálu.
- Monitoring spektra 2D – waterfall.
- Měření obsazenosti kanálu.

3.8.1 Real-time spectrum analyzer Signal Hound BB60C

Pro příjem signálu byl ČTÚ vybrán spektrální analyzátor Signal Hound BB60C, který plní i funkci signálového analyzátoru.

Mezi klíčové parametry BB60C patří především real-time záznam 2D waterfall a 3D spektrogramu s persistencí a také další [27]:

- Kmitočtový rozsah 9 kHz až 6 GHz.
- Rychlost přeběhu (sweep speed) až do 24 GHz/s (≥ 10 kHz RBW).
- Široký dynamický rozsah od -158 dBm do +10 dBm.
- RBW od 10 Hz do 10 MHz.
- Digitalizovaná IF data – 80 milionů vzorků za sekundu, okamžitá (real-time) šířka pásma od 250 kHz do 27 MHz.
- Vlastní API pro vývoj vlastní aplikace a možnost využití open-source GUI Spike.
- Podpora GPS časových značek.
- Propojení s PC přes USB 3.0 (140 MB/s), které zároveň poskytuje napájení.

Tento spektrální analyzátor byl vybrán také pro svou kompaktnost, rozměry $219 \times 81 \times 30$ mm a hmotnost 0,5 kg. Dále pak bude využita možnost vývoje vlastní aplikace, viz kapitola 3.8.3 Monitorovací software.

3.8.2 PC

Pro zpracování naměřených dat, ovládání a komunikaci s monitorovací stanicí byl dle požadavků ČTÚ vyroben průmyslový PC.

Parametry tohoto PC jsou uvedeny v následující tabulce 3.12. Klíčovými vlastnostmi tohoto PC jsou nepřetržitý provoz a použití ve venkovním prostředí (dostatečný rozsah provozních teplot). PC je spolu se spektrálním analyzátelem vidět na obrázku 3.54.

Komunikace s monitorovací stanicí bude probíhat přes vzdálenou plochu. PC je vybaveno LTE modemem (Sierra Wireless – EM 7455 [28]) spolu s konvertorem Mini PCIe na M.2 slot, který také umožňuje vložení SIM karty. Dále pak modem obsahuje GPS modul pro určení polohy stanice, která bude využívána především při zaměřování signálů – triangulace.

Tabulka 3.12 Parametry průmyslového PC

Základní deska	Mini-ITX (170 × 170 mm), Dual LAN Gigabit, paměti DDR4 pro soket SO DIMM, SATA-600, mSATA3, M.2 SSD3, PCIe x16 (Gen 3), 4 × USB 2.0, 4 × USB 3.0, 2 × LAN (RJ-45), 2 × PS/2 (myš/klávesnice), 1 × RS232, 2 × DisplayPort v1.2 a 1 × DVI-D
Procesor	Intel Core i7-7700 3,6 GHz
RAM	ECC SO-DIMM DDR4 2 × 16 GB pro průmyslové použití
Disk	SSD mSATA 512 GB pro průmyslové použití
Napájecí zdroj	Flex ATX (40 × 80 × 150 mm) 180 W s aktivní PFC a přepětovou ochranou
Operační systém	Windows 10 PRO 64bit
Skříň	220 × 220 × 85 mm se všemi konektory (i napájecím) vyvedenými pouze z jedné strany



Obrázek 3.54 Spektrální analyzátor Signal Hound BB60C spolu s průmyslovým PC.

3.8.3 Monitorovací software

Monitorovací software je vyvíjen externím odborníkem a zde bude uveden pouze jeho stručný popis.

Grafické uživatelské rozhraní pro ovládání VF jednotky a rotátoru:

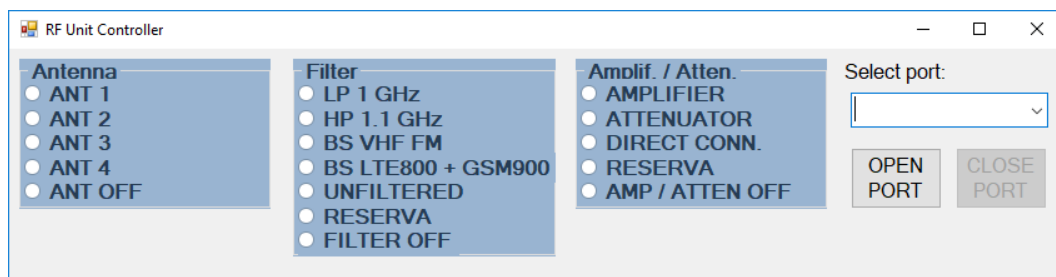
Toto GUI bude součástí monitorovacího softwaru nebo bude možné ho spustit i samostatně pro účely testování a kalibrace rotátoru.

GUI umožňuje výběr jednotlivých komponent ve VF cestě, a to ovládáním koaxiálních přepínačů. Dále nastavování útlumu atenuátoru, pokud je zvolen ve VF cestě. K tomu slouží implementace příkazů pro ovládací jednotku, viz příloha B.7 Seznam příkazů pro ovládání VF jednotky.

Pro ovládání rotátoru zde bude část obsahující kruhovou stupnici azimutu od 0° do 360° se dvěma ukazateli, pro aktuální hodnotu azimutu a ukazatel pro nastavení požadované hodnoty azimutu. Rotátor pracuje v rozsahu 0° až 450°, respektive -45° až 405°. Toto musí být zohledněno na stupnici indikací, že je přesažen základní rozsah a rotátor se otáčí směrem k záporným hodnotám azimutu, nebo je hodnota větší jak 360°. Tato funkce je využita při zaměřování, kdy se hledaný signál nachází již kousek za základním rozsahem a otáčení rotátoru na druhý konec rozsahu by bylo zdlouhavé.

Dále zde bude možnost ovládat otáčení na každou stranu pomocí tlačítek (definovaný krok) nebo zadat hodnotu azimutu číselně. Při kombinaci s monitorovacím softwarem zde bude možnost nastavit sadu hodnot azimutů, na které se má rotátor po určitém čase a v určitém pořadí natočit.

Pro kalibraci zde bude implementován nástroj ARSCONF dodávaný výrobcem. Veškeré další parametry jako umístění konkrétních dílčích zařízení mezi porty přepínače, vložný útlum pro korekci, výchozí nastavení atd., budou zaznamenány v inicializačním souboru. Na obrázku 3.55 je vidět první verze GUI, které bylo vytvořeno pro testování ovládání VF jednotky a není zde ještě vytvořena část pro ovládání rotátoru.



Obrázek 3.55 První verze GUI pro testování ovládání VF jednotky.

Monitorovací software:

Tento monitorovací software bude používán v kombinaci se spektrálním analyzátozem Signal Hound BB60C. Hlavními požadavky pro monitorovací software jsou:

- Možnost přeladování:
 - START a STOP kmitočet.
 - Měření na jednom kmitočtu (kanálu).

- Přeladňování na základě kmitočtového (kanálového) listu.
- Zobrazení:
 - Real-time spektrum.
 - Spektrum – Y-t diagram (spektrum na vybraném přeběhu).
 - 2D waterfall.
 - Možnost výběru libovolné části z uložených dat pro zobrazení (v čase i kmitočtu).
- Ukládání dat ve vhodném formátu.
- Vyhodnocování:
 - Měření úrovně pole – dB μ V/m (databáze korekcí použitých antén a útlum VF cesty).
 - Kanálová obsazenost – nastavení prahu pro vyhodnocování.
- Časové plánování měření.
- Zaměřování – použití rotátoru se směrovými anténami (list předdefinovaných hodnot azimutu).
- Možnost využití všech funkcí Spektrálního analyzátoru Signal Hound BB60C

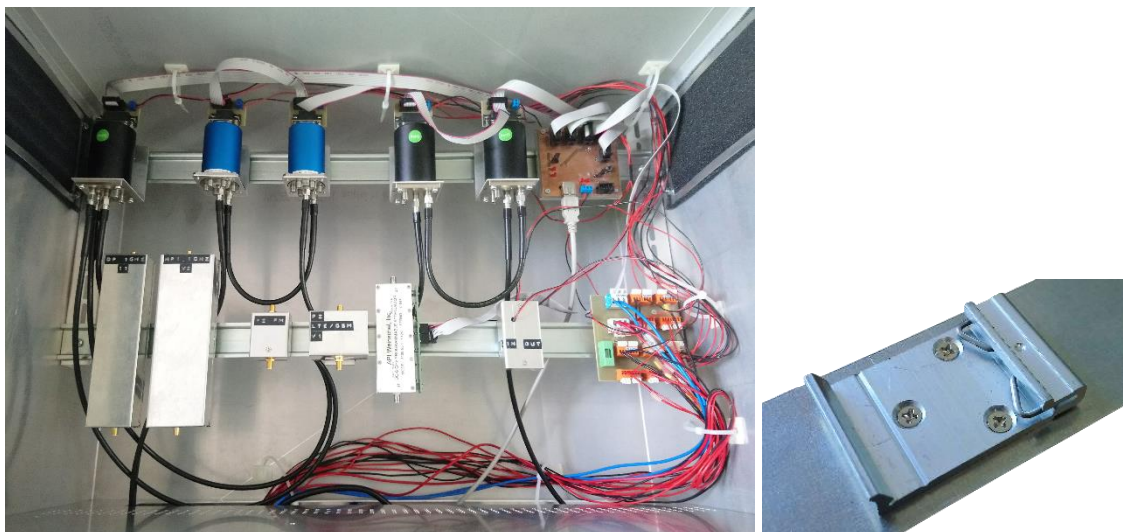
3.9 Celková konstrukce zařízení

Celá monitorovací stanice je umístěna ve skříni zhotovené na míru specializovanou firmou. Tato skříň je uzpůsobena pro umístění ve venkovních prostorech, kde musí odolat běžným povětrnostním vlivům, stupeň krytí této skříně je IP 54.

Skříň je vyrobena z hliníkového plechu z důvodu jeho nízké hmotnosti a její vnější povrch je lakován. Po obou bocích jsou nahoře a dole větrací výřezy, které v kombinaci s otvory na spodní straně (okolo desky s konektory) umožňují přirozenou cirkulaci vzduchu. Otvory jsou z vnitřní strany překryty filtračním materiálem, který zamezuje prostupu prachu a hmyzu. Filtrační otvor v blízkosti PC a napájecího zdroje, kde je předpoklad zvýšení teploty, je vybaven ventilátorem 80 × 80 mm pro zvýšení odvodu tepla od těchto dvou zařízení. Čelní strana skříně je uzavřena krytem s těsněním po obvodu a zajištěna čtyřmi šrouby.

Stanice může být umístěna ve vodorovné nebo svislé poloze, upevněna na stěnu nebo ke stožáru.

Převážná část VF jednotky monitorovací stanice je umístěna v horní části skříně, kde jsou vodorovně instalovány dvě DIN lišty 35 × 7,5 mm. Ty je možné vertikálně posouvat po bočních držácích. Jednotlivá dílčí zařízení jsou vybavena držáky na tyto DIN lišty, které umožňují posun v horizontálním směru. Touto kombinací je možné upravit polohu každého dílčího zařízení. Na následujícím obrázku 3.56 je vidět rozmístění dílčích zařízení VF jednotky v horní části skříně. Pro přehlednost nebyla osazena veškerá VF kabeláž. Také je zde fotografie držáku na DIN lištu.



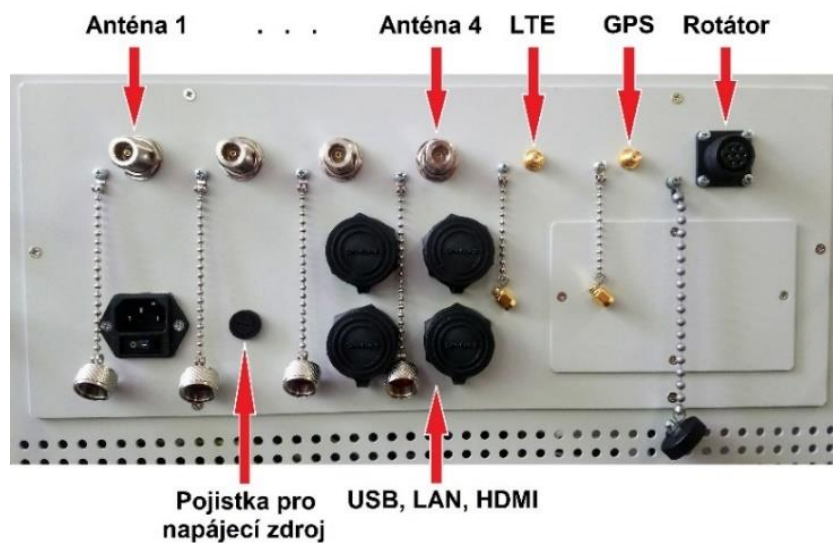
Obrázek 3.56 Část vysokofrekvenční jednotky umístěná na DIN lištách (vlevo) a držák na DIN lištu (vpravo).

Na spodní straně skříně je umístěna odnímatelná deska s konektory pro připojení napájení, signálu z antén, rotátoru atd. Konektory jsou zvoleny pro venkovní použití, kdy jsou vybaveny těsněním mezi panelem a konektorem a také krytkou.

Pro připojení až čtyř antén byly zvoleny N konektory, kterými je většina antén uvedených v kapitole 2.1 Rozdělení do kmitočtových subpásem a výběr antén vybavena. Tyto N konektory montované do panelu jsou na druhé straně opatřeny SMA konektory (přechod N na SMA) a jsou spojeny s prvním koaxiálním přepínačem.

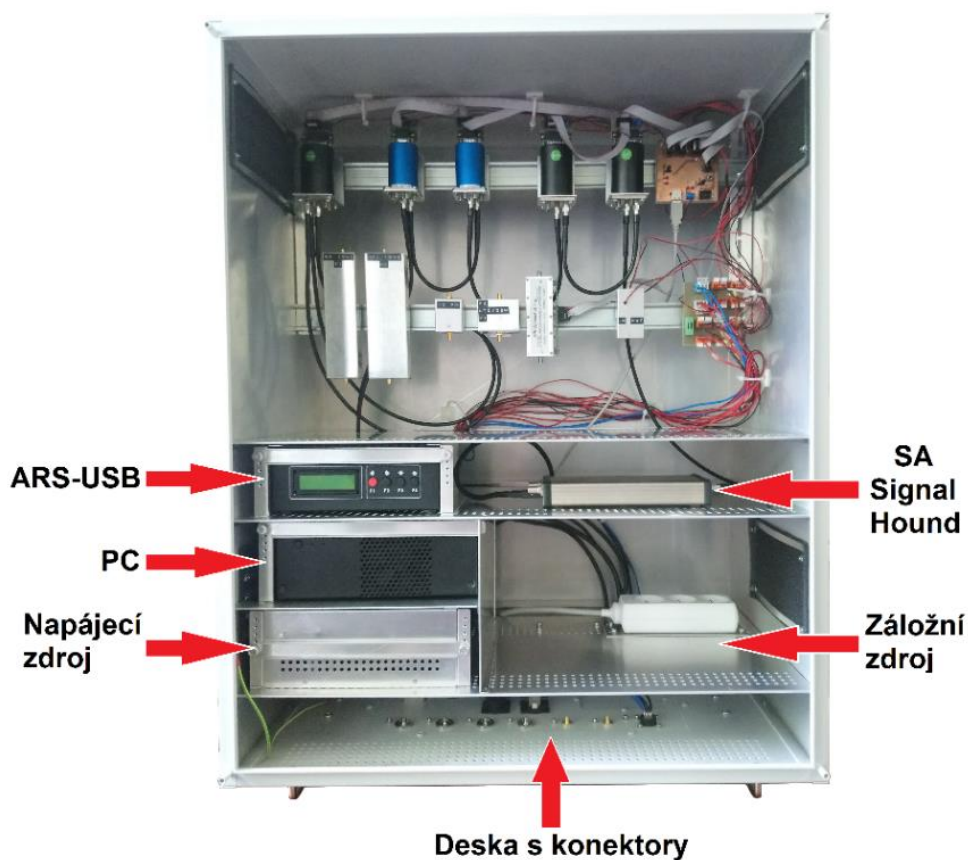
Pro připojení rotátoru byl vybrán sedmipinový kulatý konektor se závitem. Na druhé straně jsou pájecí piny, od kterých je vedena kabeláž do ovládací jednotky pro rotátor.

Dále jsou na desce umístěny SMA konektory pro připojení GPS a LTE antény modemu, který je součástí PC. Od tohoto PC jsou také vyvedeny konektory 2 × USB 3.0, LAN RJ-45 a HDMI, které slouží pro připojení periférií k PC a práci s MS přímo na místě. Pro připojení napájení ze sítě je osazena IEC zásuvka s vypínačem a EMI filtrem. Na této desce je umístěna další menší deska, která slouží pro případné další konektory. Celá deska spolu s popisky je vidět na obrázku 3.57.



Obrázek 3.57 Deska s konektory pro propojení monitorovací stanice.

Na následujícím obrázku 3.58 je vidět celá monitorovací stanice s popisky. Na fotografii ještě není nainstalován záložní zdroj. Celkové rozměry monitorovací stanice jsou $630 \times 785 \times 400$ mm.



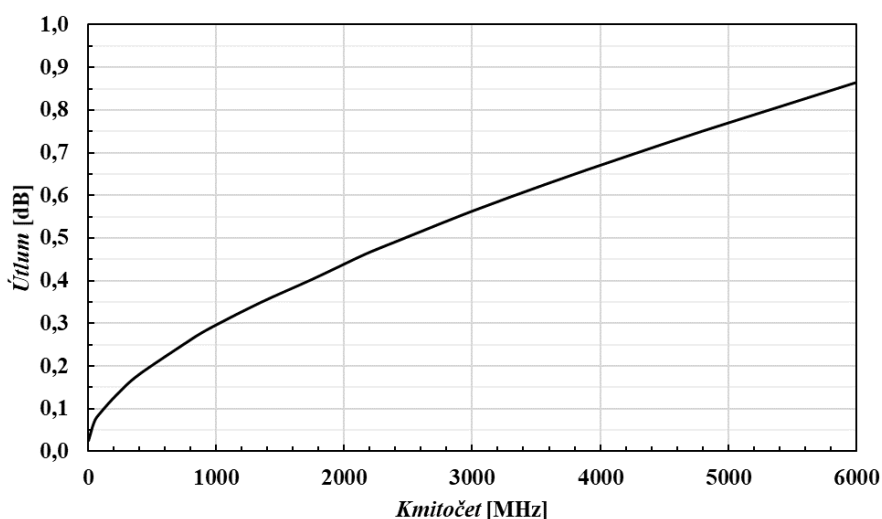
Obrázek 3.58 Monitorovací stanice s popisky jednotlivých dílčích zařízení.

Veškeré tyto konstrukční části byly vyrobeny specializovanou firmou dle zadaných požadavků. Tato firma standardně neposkytuje dokumentaci k jejím výrobkům, proto jsou zde uvedeny pouze fotografie a v elektronické příloze je 3D model.

3.9.1 VF Kabeláž

Veškerá dílčí zařízení jsou pro připojení VF signálu vybavena SMA konektory zásuvka (female) normální polarity.

Koaxiální kabel byl použit BELDEN H155A0, s charakteristickou impedancí $50\ \Omega$, vnitřním vodičem Cu licna a PE izolací. Při výrobě kabelů a rozmístění dílčích zařízení na DIN lištách musel být brán ohled na minimální rádius statického ohybu, který je pro tento kabel 60 mm. Na následujícím grafu – obrázek 3.59 je vidět průběh útlumu kabelu v závislosti na kmitočtu, převzato z datového listu [29].



Obrázek 3.59 Útlum kabelu v závislosti na kmitočtu pro 1 m délky udávaný výrobcem [29].

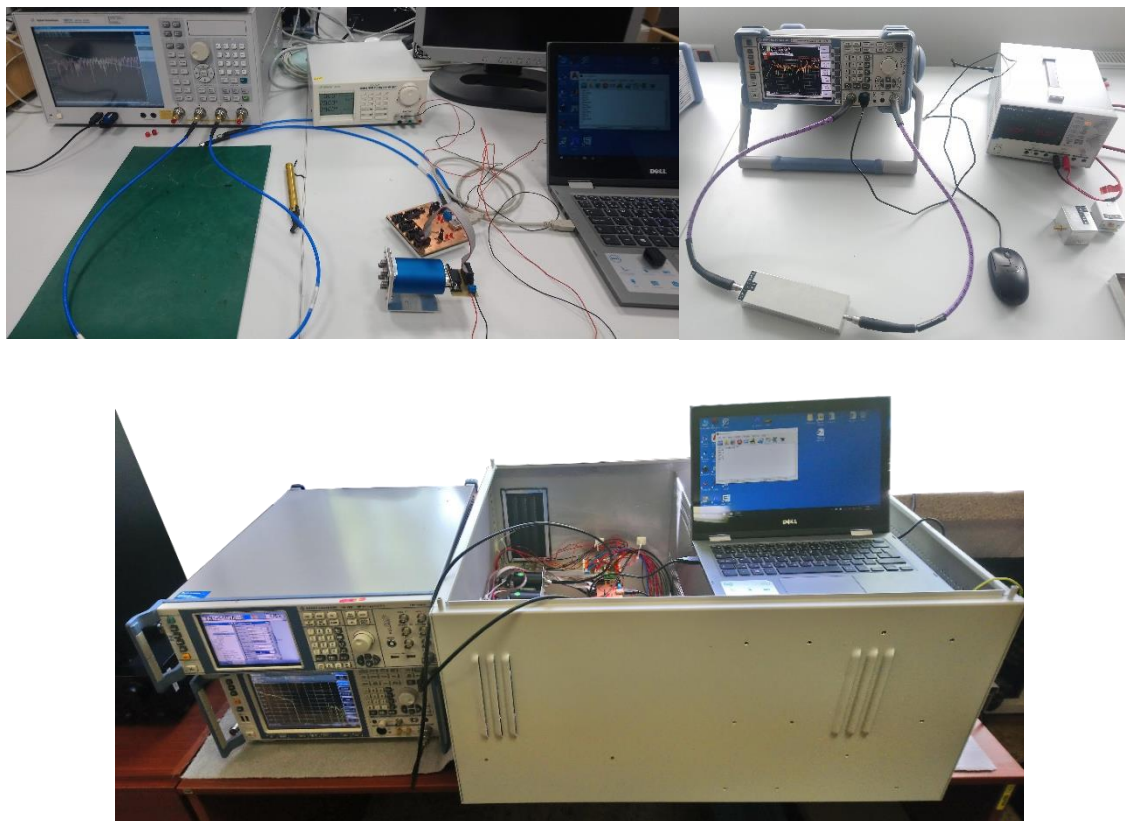
Kabely byly vyráběny přímo na míru rozmístěným zařízením. Konektory jsou použity krimpovací SMA zástrčka (male) normální polarity TELEGÄRTNER J01150A0618. Tyto konektory lze použít v kombinaci s kabelem H155 v kmitočtovém rozsahu 0 až 6 GHz.

Celkem bylo vyrobeno 21 kusu kabelů, které byly ještě opatřeny u každého konektoru teplem smrštiteľnou trubičkou o délce 50 mm pro zpevnění spoje kabel – konektor.

3.10 Měření parametrů VF jednotky

Měření vybraných parametrů dílčích zařízení je uvedeno v předchozích kapitolách týkajících se návrhu. Zde bude uvedeno pouze měření VF jednoty jako celku.

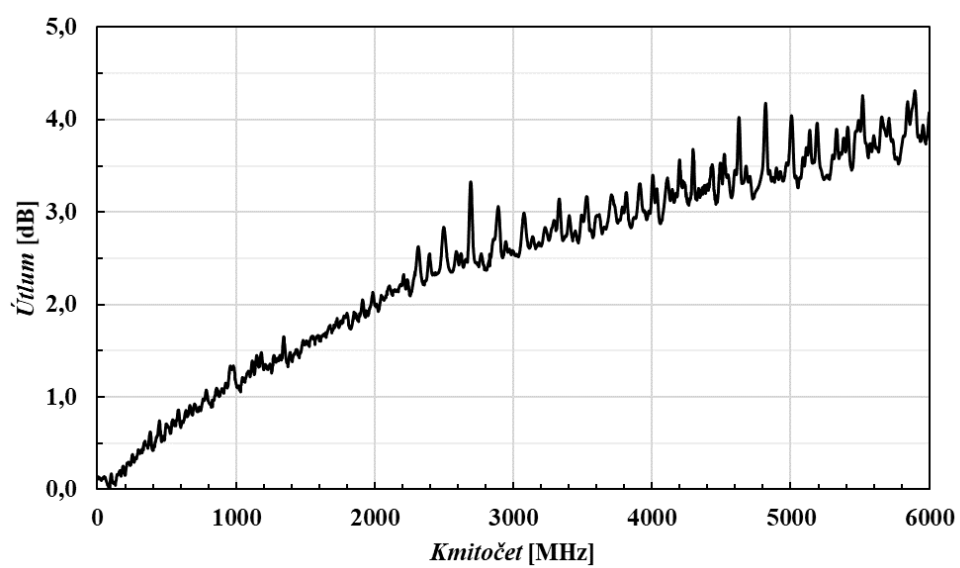
Na následujícím obrázku 3.60 jsou fotografie měřicích pracovišť, která byla použita.



Obrázek 3.60 Fotografie měřicích pracovišť VUT a OTP Brno.

Pro účely návrhu monitorovacího softwaru byl měřen celkový útlum přímé cesty, tzn. bez filtru, zesilovače nebo atenuátoru, pouze kabeláž a koaxiální přepínače. Tento útlum bude použit při korekci naměřených výsledků v monitorovacím softwaru.

Na následujícím obrázku 3.61 je vidět průběh útlumu této přímé cesty v závislosti na kmitočtu. Tento útlum platí pro 3 m koaxiálního kabelu, 12 ks SMA konektorů na kabeláži, panelovou redukci N na SMA a 5 koaxiálních přepínačů. Tento výsledný útlum odpovídá součtu útlumů dílčích částí. Průběh byl měřen spektrálním analyzátozem Rohde & Schwarz FSL.



Obrázek 3.60 Graf průběhu *útlumu* přímé cesty v závislosti na kmitočtu.

Další měření vybraných parametrů bude probíhat až po kompletaci celé monitorovací stanice, a to včetně monitorovacího softwaru s GUI pro ovládání VF jednotky a rotátoru.

4 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo prostudovat principy a techniky monitoringu rádiového spektra a seznámit se s metodami používanými Českým telekomunikačním úřadem. Dále pak provést analýzu a systémový návrh řešení vysokofrekvenční jednotky pro přenosnou monitorovací stanici. Při výběru jednotlivých dílčích zařízení měl být brán v úvahu vlastní návrh nebo použití komerčně dostupného zařízení. Na základě tohoto návrhu měla být provedena realizace vysokofrekvenční jednotky, ověření její funkčnosti a změřeny vybrané parametry.

Návrh celé vysokofrekvenční jednotky byl pojat jako modulární zařízení. Jednotlivá dílčí zařízení jsou opatřena konektory pro připojení VF signálu, napájení a ovládání, což umožňuje jejich výměnu nebo doplnění o další zařízení. Takový koncept zajišťuje široké možnosti využití vysokofrekvenční jednotky a tím i celé monitorovací stanice.

V úvodu práce jsou stručně popsány principy a účely monitorování kmitočtového spektra, které provádí Český telekomunikační úřad. Je zde uvedeno i technické vybavení, které k monitoringu používá.

První polovina je věnována návrhu vysokofrekvenční jednotky druhá pak realizaci a ověření funkčnosti měřením vybraných parametrů.

Na začátku bylo celé kmitočtové pásmo rozděleno do tří subpásem a pro každé subpásmo následně vybráno několik typických antén, které by bylo možno použít. Hranice těchto subpásem nejsou pevně dané, ale závisí vždy na konkrétní anténě, takže jednotlivá subpásma se mohou i překrývat. Antény byly vybrány jako komerčně dostupné od několika výrobců a byly porovnány jejich parametry.

S anténami souvisí rotátor. Požadavek byl na azimutální rotátor s možností ovládání přes PC. Z důvodu dobrých vlastností ověřených provozem v ČTÚ byly vybrány rotátory od výrobce YAESU. V úvahu připadají typy G-800 a G-1000. K ovládání rotátoru je použita univerzální ovládací jednotka ARS-USB umožňující ovládání prostřednictvím PC. Ovládání se bude provádět přes grafické uživatelské rozhraní v monitorovacím softwaru.

K úpravě přijatého signálu, co se týče kmitočtového pásma byla navržena sada čtyř filtrů a následně byly filtry zrealizovány. Návrh probíhal pomocí prototypových dolních propustí a byla použita Chebyshevova a eliptická aproximace. Dolní a horní propust byla realizována jako mikropáskové struktury, pásmová zádrž VKV-FM z SMD cívek a kondenzátorů a pásmová zádrž LTE 800/GSM 900 ze vzduchových cívek a SMD kondenzátorů. Pro každý filtr byla vyrobena krabice a u dolní propusti navíc ještě vyplněna pěnovým absorbérem pro potlačení šíření signálu uvnitř krabice.

Pro úpravu úrovně signálu byl vybrán širokopásmový nízkošumový zesilovač Mini-Circuits ZX60-V63+ ve formě modulu. Ten byl doplněn o tranzistorový spínač napájení a umístěn do krabice. Druhým zařízením pro úpravu úrovně signálu je atenuátor. Výsledkem výběru je atenuátor API Weinschel 3406-55 taktéž ve formě modulu. Atenuátor je složen ze šesti dílčích útlumových článků s TTL ovládáním pro každý článek. Příslušnou kombinací je dosaženo útlumu v rozmezí 0 až 55 dB s krokem 1 dB.

Dílní zařízení popsaná ve dvou předešlých odstavcích jsou vybírána do VF cesty pomocí koaxiálních přepínačů. Každé z těchto zařízení je umístěno mezi porty dvojice přepínačů. Na čtveřici portů prvního přepínače jsou připojeny anténní vstupy a výstup posledního pátého přepínače je připojen na vstup SA. V této koncepci je i přímá cesta od antény k SA a bylo zde počítáno i s rezervou pro další zařízení. Na základě vlastností ověřených měření byly vybrány elektromechanické koaxiální přepínače, které dosahovaly lepších parametrů jak přepínače ve formě integrovaného obvodu. Ve vysokofrekvenční jednotce jsou použity tři čtyřportové přepínače TEleRel TR04 a dva šestiportové přepínače Teledyne CCR-38S.

Takto sestavená vysokofrekvenční jednotka je řízena ovládací jednotkou vlastního návrhu a konstrukce, která komunikuje s PC přes USB rozhraní. Pomocí sady příkazů je možné vybírat cestu VF signálu a nastavovat útlum atenuátoru. Spínání jednotlivých zařízení zajišťuje mikrokontrolér ATmega 165PA a komunikaci s PC převodník USART – USB FT232RL.

Pro napájení zařízení vysokofrekvenční jednotky a rotátoru byl navržen a zkonstruován lineární napájecí zdroj se šesti výstupními napětími.

Další částí je konstrukční provedení vysokofrekvenční jednotky a tím pádem i celé monitorovací stanice. Většina mechanických částí počínaje skříní přes uchycení všech zařízení až po krabičky pro zařízení vlastního návrhu a konstrukce byla vyrobena specializovanou firmou. Firmě byly dodány podklady a postupně konzultován návrh a výroba.

Poslední částí, která nesouvisí přímo se zadáním této diplomové práce, ale je podstatnou součástí monitorovací stanice, je monitorovací software, který je vyvíjen externím odborníkem a ve kterém bude i grafické uživatelské rozhraní sloužící k ovládání rotátoru a vysokofrekvenční jednotky. Samotný monitoring kmitočtového spektra bude zajišťovat spektrální analyzátor Signal Hound BB60C a PC. Tato dvě zařízení byla vybrána Českým telekomunikačním úřadem.

Ověření funkčnosti vysokofrekvenční jednotky bylo provedeno nejprve po částech, a to měření vybraných parametrů zařízení vlastního návrhu, zdali vyhovují zadaným požadavkům. Stejně byla měřena i komerčně dostupná dílní zařízení, a to pro ověření parametrů udávaných výrobcem. Poté byla jednotka sestavena jako celek a ověřena její funkčnost a zároveň funkčnost napájení a ovládání.

Součástí elektronických příloh je i návod na obsluhu monitorovací stanice. V zadání diplomové práce byl požadován návod pro vysokofrekvenční jednotku. Ten je součástí návodu pro celou monitorovací stanici, který však není ještě kompletní. Doplněn bude až po dokončení celé monitorovací stanice. Část týkající se vysokofrekvenční jednotky je dokončena a vychází z této diplomové práce.

Velké množství času bylo věnováno výběru dílních zařízení, kdy do rozhodování vstupovaly podmínky jako dostupnost, cena a dodací lhůty, které u některých komponent byly i v řádech několika týdnů. Další časově náročnou částí bylo vytvoření podkladů pro výrobu konstrukčních částí a konzultace s výrobcem, kdy ne vždy se povedlo navrhnout a vyrobit konstrukční díly podle požadovaných parametrů. Z tohoto důvodu musely být některé díly upraveny anebo vyrobeny nové. V diplomové práci jsou návrh a realizace vysokofrekvenční jednotky zestručněny do nezbytné míry. Detailní popis návrhu by byl nad přípustný rozsah diplomové práce.

Návrh a realizace vysokofrekvenční jednotky jsou dokončeny, ale monitorovací stanice jako celek ne. Dalším postupem je ještě dokončení některých částí, dlouhodobé testování v reálných podmínkách už s monitorovacím software a případná modifikace dle výsledků testování.

LITERATURA

- [1] International Telecommunication Union. [online]. Geneva (Switzerland): ©2017 [cit. 2018-4-12]. Dostupné z: www.itu.int.
- [2] Český telekomunikační úřad. *Národní kmitočtová tabulka*. [online]. 2017 [cit. 2018-6-12]. Dostupné z: www.spektrum.ctu.cz. Součást webové aplikace Využití rádiového spektra.
- [3] Český telekomunikační úřad. [online]. Praha (Česká republika): ©2017 [cit. 2018-4-12]. Dostupné z: www.ctu.cz.
- [4] Rohde & Schwarz. [online]. Mnichov (Německo): ©2017 [cit. 2018-27-10]. Dostupné z: www.rohde-schwarz.com.
- [5] Telewave, Incorporated. [online]. San Jose (USA): ©2017 [cit. 2018-31-10]. Dostupné z: www.telewave.com.
- [6] Telemeter Electronic. [online]. České Vrbné (Česká republika): ©2017 [cit. 2019-6-3]. Dostupné z: www.telemeter.info/cz.
- [7] Analog Devices. [online]. Norwood (USA): ©1995-2017 [cit. 2018-2-11]. Dostupné z: www.analog.com.
- [8] HONG, J. S. and M. J. LANCASTER. *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications*. New York: J. Wiley and Sons, 2001. ISBN: 0-471-38877-7.
- [9] Nuhertz Technologies, LLC. [online]. Mesa, Arizona (USA): ©2013 [cit. 2018-4-12]. Dostupné z: www.nuhertz.com.
- [10] RAIDA, Z. *Přednášky z předmětu CAD v mikrovlnné technice*. [online]. Brno: FEKT VUT v Brně [cit. 2019-3-4]. Dostupné z: www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/mcvt/index.htm.
- [11] VÁGNER, P. *Vysokofrekvenční technika*. [online]. Brno: Skripta FEKT VUT v Brně, 2013 [cit. 2018-27-11]. Dostupné z: www.vutbr.cz/studium/ects-katalog/detail-predmetu?apid=184094.
- [12] Mini-Circuits. [online]. Brooklyn NY (USA). [cit. 2018-27-11]. Dostupné z: www.minicircuits.com.
- [13] API Technologies Corporation, Weinschel. [online]. Marlborough (USA): ©2017 [cit. 2018-20-11]. Dostupné z: www.weinschel.apitech.com.
- [14] YAESU. *YAESU G-800DXA G-1000DXA G-2800DXA Antenna Rotator & Controller User Manual*. [online]. Japan: Vertex Standard Co., Ltd. [cit. 2018-24-11]. Dostupné z: www.yaesu.com.
- [15] EA4TX. [online]. Madrid (Spain). [cit. 2019-12-3]. Dostupné z: www.ea4tx.com.
- [16] YAESU. [online]. USA: ©2003-2017 [cit. 2018-24-11]. Dostupné z: www.yaesu.com.
- [17] Analog Devices, Inc. *Data Sheet High Isolation, Silicon SP4T, Nonreflective Switch, 9 kHz to 12.0 GHz ADRF5040*. [online]. [cit. 2019-17-4]. Rev. B. Dostupné z: www.analog.com.
- [18] Telemeter Electronic GmbH. *Koaxialrelais, Series TR03 bis TR06*. [online]. [cit. 2019-21-4]. Dostupné z: www.telemeter.info.
- [19] Teledyne Coax Switches. *Teledyne Coax Switches Series CCR-38S/CR-38S*. [online]. © 2016 [cit. 2019-21-4]. Dostupné z: www.teledynecoax.com.

- [20] Holland Shielding Systems BV. [online]. Dordrecht (Netherlands): ©2019 [cit. 2019-24-4]. Dostupné z: www.hollandshielding.com.
- [21] Coil32 - freeware coil inductance calculating. [online]. ©2019 [cit. 2019-24-4]. Dostupné z: www.coil32.net.
- [22] Mini-Circuits. *High Gain, High IP3 Wideband Amplifier ZX60-V63+*. [online]. Brooklyn, New York (USA): [cit. 2019-24-4]. Dostupné z: www.minicircuits.com.
- [23] API Technologies corp. *Programmable Attenuators Models 3404, 3406, 3408 & 3409*. [online]. Frederick, Maryland (USA): Revision Date: 10/2016 [cit. 2019-24-4]. Dostupné z: www.apitech.com.
- [24] SOFTPEDIA. [online]. © 2001-2019 [cit. 2019-27-4]. Dostupné z: www.softpedia.com.
- [25] PS electronic, s.r.o. [online]. Praha (Česká republika) [cit. 2019-30-4]. Dostupné z: www.pselectronic.cz.
- [26] Střední odborné učiliště technické Chotěboř. *Výpočty chlazení elektronických součástí s řešenými příklady*. [online]. Chotěboř (Česká republika) [cit. 2019-30-4]. Dostupné z: www.souch.cz.
- [27] Signal Hound. [online]. Battle Ground, Washington (USA): ©2019 [cit. 2019-8-3]. Dostupné z: www.signalhound.com.
- [28] Sierra Wireless, Inc. [online]. Richmond, British Columbia (Canada): ©2019 [cit. 2019-8-3]. Dostupné z: www.sierrawireless.com.
- [29] BELDEN. *Technical Data Sheet H155A01coaxial cable*. [online]. 13 Červen 2013 [cit. 2019-20-4]. Verze 2. Dostupné z: www.beldensolutions.com.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

PC	Počítač
ITU	International Telecommunication Union
SM	Spectrum Management
ČTÚ	Český telekomunikační úřad
ASMKS	Automatizovaný systém monitorování kmitočtového spektra
SOMS	Stacionární obsluhovaná monitorovací stanice
SNMS	Stacionární neobsluhovaná monitorovací stanice
MNMS	Mobilní neobsluhovaná monitorovací stanice
MOMS	Mobilní obsluhovaná monitorovací stanice
SDR	Softwarově definované rádio
SA	Spektrální analyzátor
VKV	Velmi krátké vlny
FM	Frekvenční modulace
LTE	Long Term Evolution
GSM	Globální systém pro mobilní komunikace (Groupe Spécial Mobile)
<i>PSV</i>	Poměr stojatých vln
<i>AF</i>	Anténní faktor
VF	Vysokofrekvenční
SPST	Single Pole, Single Throw
SPDT	Single Pole, Double Throw
SP4T	Single Pole, Four Throw
SP6T	Single Pole, Six Throw
COM	Common
PIN	Polovodičová dioda, která má mezi PN přechodem nedotovanou intrinsickou polovodičovou oblast
FET	Field Effect Transistor
MMIC	Monolithic Microwave Integrated Circuit
TTL	Transistor-Transistor Logic
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
SMA	Sub Miniature version A
BCD	Binary Coded Decimal
PIM	Passive Intermodulation

LFCS	Lead Frame Chip Scale Package
V_{DD}	Kladné napájecí napětí
V_{SS}	Záporné napájecí napětí
LGA	Land Grid Array pouzdro
QFN	Quad Flat No-lead pouzdro
USB	Universal Serial Bus
L	Průchozí (vložený) útlum
Ω	Normovaný kmitočet
g	Normované vodivosti
h	Výška/tloušťka
ε_r	Relativní permitivita
$\text{tg}\delta$	Ztrátový úhel
Z	Impedance
S_{21}	Přenos dvojbranu
d, D	Průměr
w	Šířka
l	Délka
θ	Elektrická délka
f	Kmitočet
y	Normovaná charakteristická admitance
LNA	Low Noise Amplifier
F	Šumové číslo
SNR	Signal to Noise Ratio
IP3	3rd Order Intercept Point – Bod zahrazení pro intermodulační produkty 3. řádu
$IIP3$	Input 3rd Order Intercept Point
$OIP3$	Output 3rd Order Intercept Point
P_{1dB}	Bod jednodedbelové komprese
GaAs	Gallium Arsenide
IO	Integrovaný obvod
LE	Latch Enable
K	Konstanta pro určení maximálního zatížení rotátoru
ARS	Antenna Rotator System
A/D	Analogově digitální

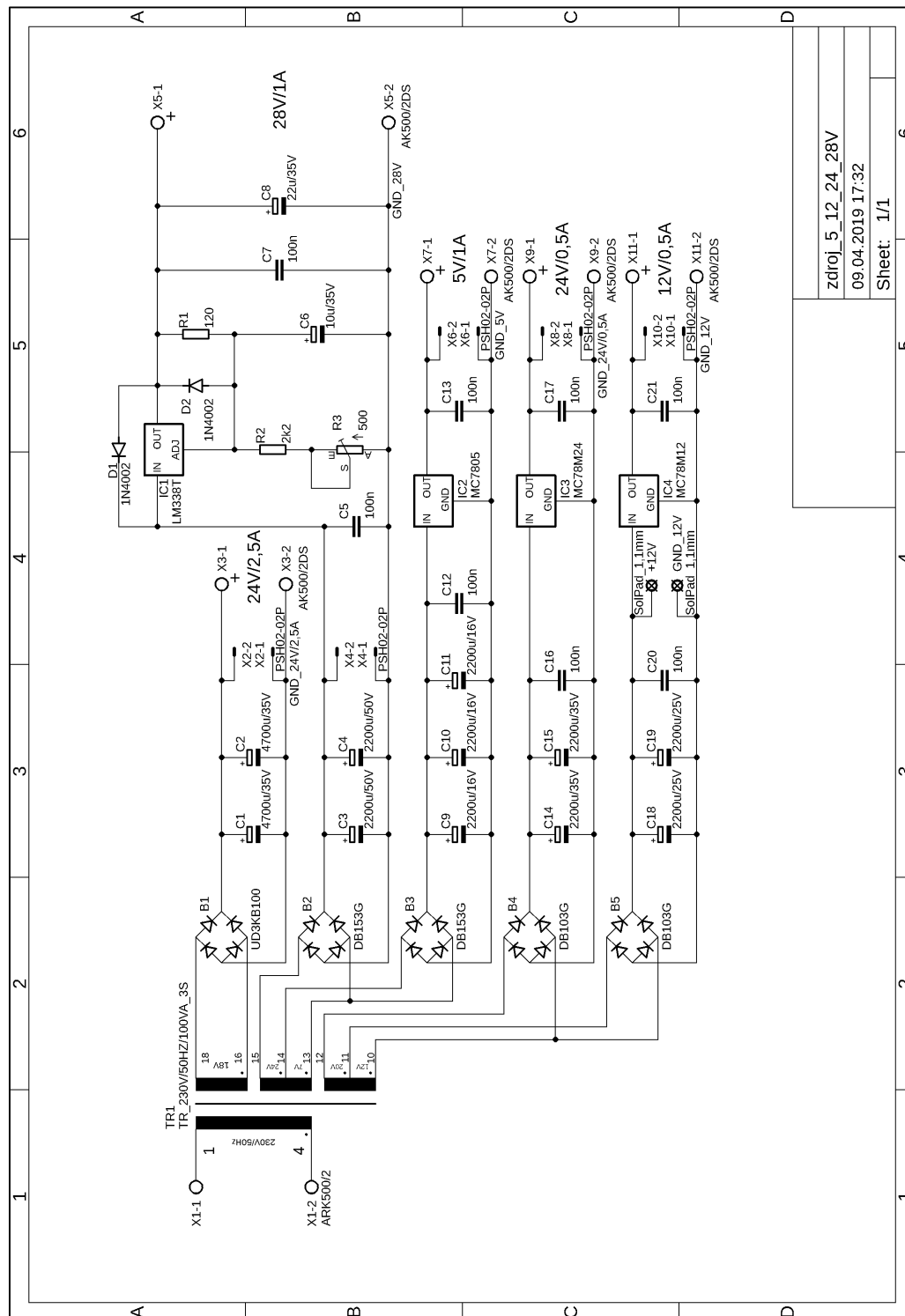
I/O	Vstupně výstupní
SPI	Serial Peripheral Interface
USART	Universal Synchronous / Asynchronous Receiver and Transmitter
SMD	Surface Mount Device
TQFP	Thin Quad Flat Package
RX	Receive
TX	Transmission
DPS	Deska plošných spojů
DIN	Deutsches Institut für Normung
Q	Jakost
p	Vzdálenost mezi závity
MS	Monitorovací stanice
HI/LO	Vysoká/nízká úroveň
MCU	Microcontroller Unit
SCK	Clock
MOSI	Master Out, Slave In
MISO	Master In, Slave Out
LED	Light Emitting Diode
ANT	Anténa
FILT	Filtr
AA	Atenuátor/zesilovač (amplifier)
SETATT	Nastavit hodnotu útlumu atenuátoru
CR	Carriage Return
LF	Line Feed
RAM	Random Access Memory
U_T	Napětí na sekundárním vinutí transformátoru
U_D	Úbytek napětí na usměrňovači
U_C	Napětí na kondenzátoru
U_{DROP}	Úbytek napětí na lineárním stabilizátoru napětí
I_{OUT}	Výstupní proud
U_{OUT}	Výstupní napětí
EI	Tvar plechů transformátoru
SOT	Small Outline Transistor
R_{thjc}	Tepelný odpor rozhraní polovodičový přechod pouzdro součástky

R_{thca}	Tepelný odpor rozhraní pouzdro součástky okolí
R_{tht}	Tepelný odpor rozhraní podložka a chladič/pouzdro součástky
R_{thi}	Tepelný odpor podložky
R_{thcl}	Tepelný odpor chladiče
R_{thcl}	Tepelný odpor rozhraní polovodičový přechod okolí
$\vartheta_{j\max}$	Maximální teplota polovodičového přechodu
ϑ_a	Teplota okolí
P_{MAX}	Maximální tepelný výkon, který je součástka schopna rozptýlit do okolí bez použití přídavného chladiče
P_{DROP}	Ztrátový tepelný výkon
R_{th}	Tepelný odpor
λ	Tepelná vodivost
C	Korekční faktor
S	Plocha
AWG	American Wire Gauge
PVC	Polyvinylchlorid
EMI	Electromagnetic Interference
LCD	Liquid Crystal Display
RBW	Resolution Bandwidth
IF	Intermediate Frequency
API	Application Programming Interface
GUI	Grafické uživatelské rozhraní
GPS	Global Positioning System
PCIe	Peripheral Component Interconnect Express
SIM	Subscriber Identity Module
LAN	Local Area Network
DDR	Double Data Rate
ECC	Error Correcting Code
SO DIMM	Small Outline Dual In-line Memory Module
SATA	Serial Advanced Technology Attachment
SSD	Solid-state Drive
DVI-D	Digital Visual Interface-Digital Only
ATX	Advanced Technology Extended
PFC	Power Factor Correction

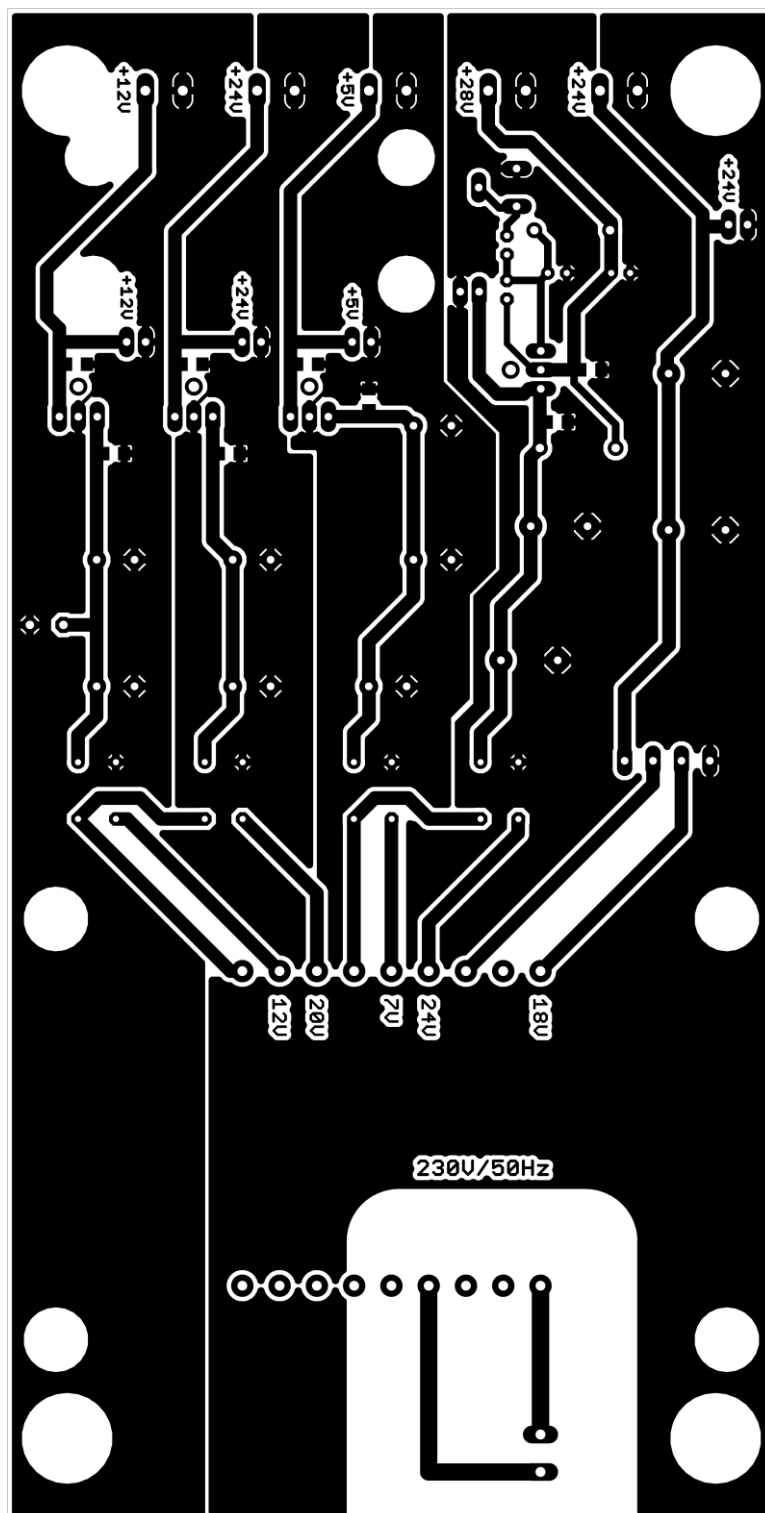
PRO	Professional
IP	Ingress Protection
HDMI	High-Definition Multimedia Interface
PE	Polyethylene

A NAPÁJENÍ

A.1 Zdroj 5 V, 12 V, 24 V a 28 V – obvodové zapojení

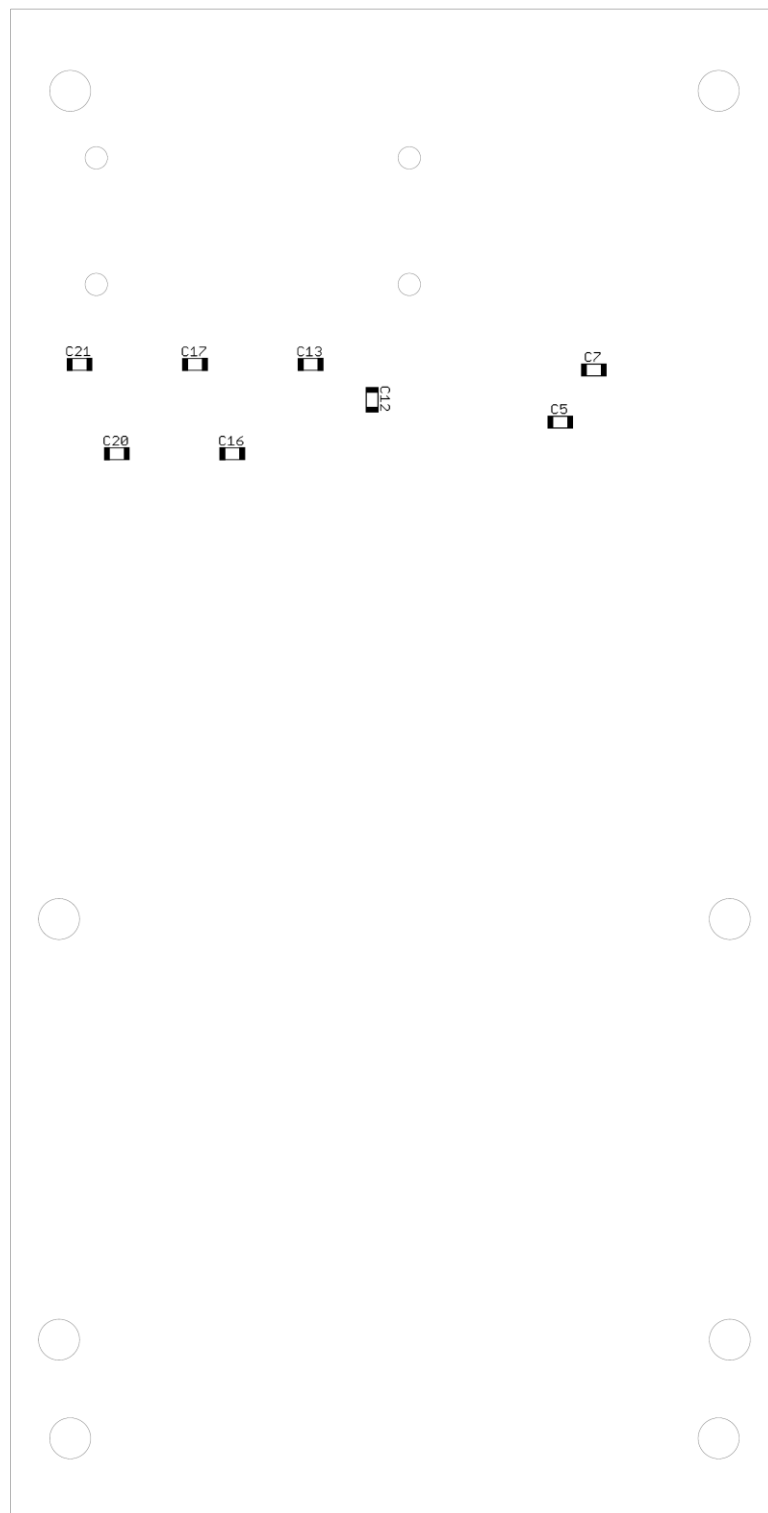


A.2 Zdroj 5 V, 12 V, 24 V a 28 V – deska plošného spoje – bottom



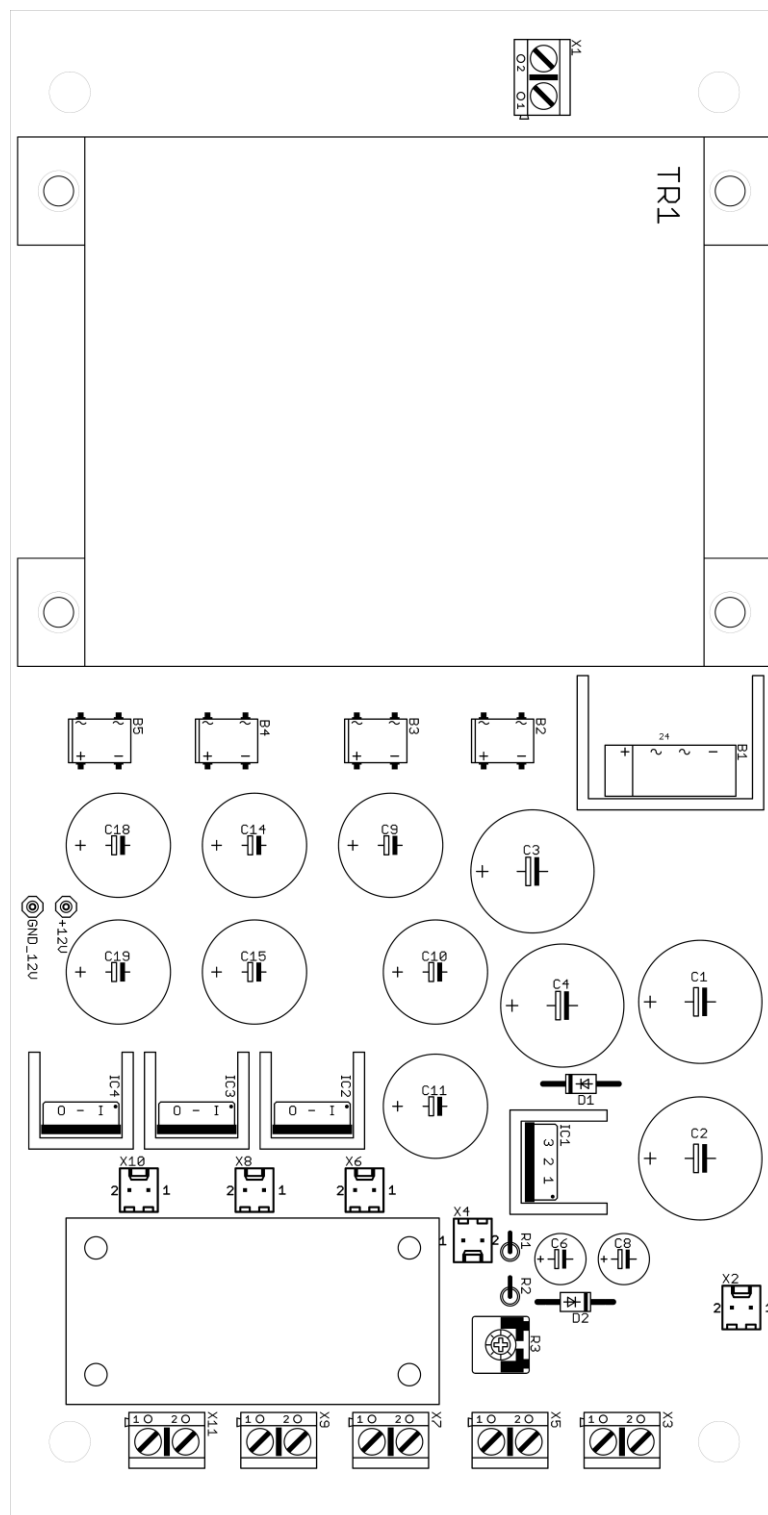
Rozměr desky 100×200 [mm], měřítko M 1:1

A.3 Zdroj 5 V, 12 V, 24 V a 28 V – osazovací výkres – bottom



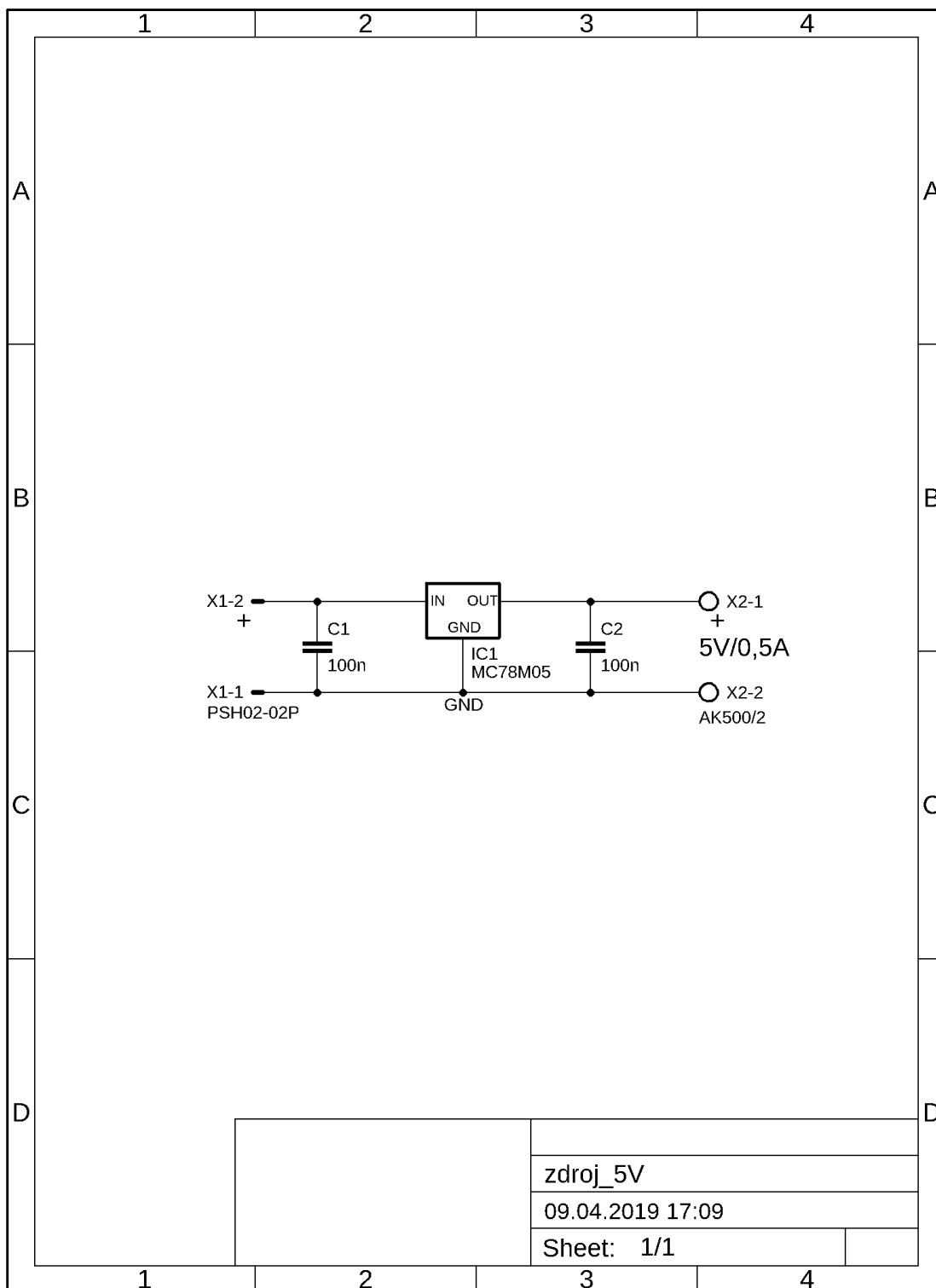
Měřítko M 1:1

A.4 Zdroj 5 V, 12 V, 24 V a 28 V – osazovací výkres – top

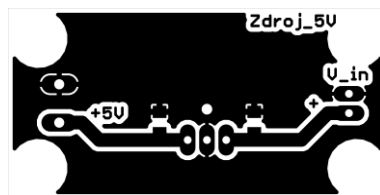


Měřítko M 1:1

A.5 Zdroj 5 V – obvodové zapojení

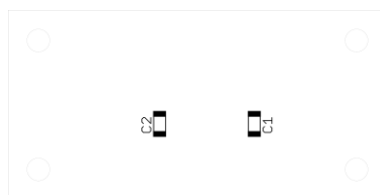


A.6 Zdroj 5 V – deska plošného spoje – bottom



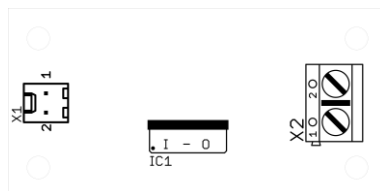
Rozměr desky 50×25 [mm], měřítko M 1:1

A.7 Zdroj 5 V – osazovací výkres – bottom



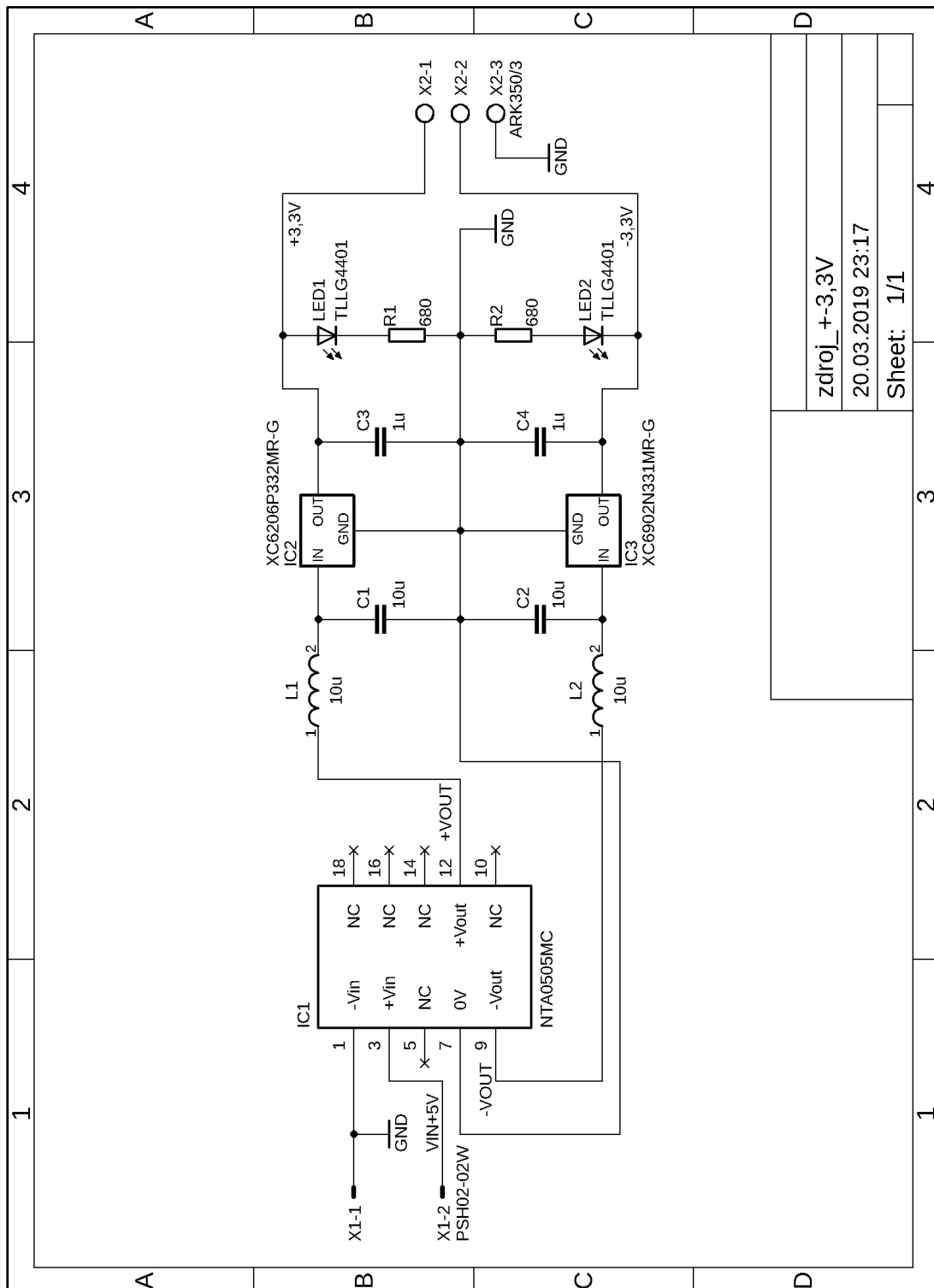
Měřítko M 1:1

A.8 Zdroj 5 V – osazovací výkres – top

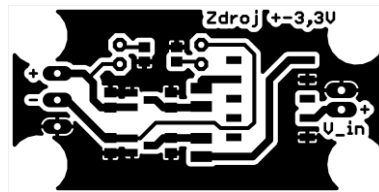


Měřítko M 1:1

A.9 Zdroj $\pm 3,3$ V – obvodové zapojení

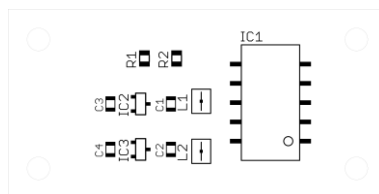


A.10 Zdroj $\pm 3,3$ V – deska plošného spoje – bottom



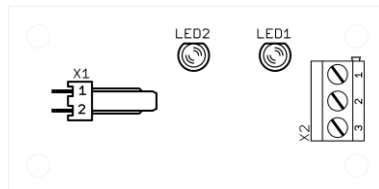
Rozměr desky 50×25 [mm], měřítko M 1:1

A.11 Zdroj $\pm 3,3$ V – osazovací výkres – bottom



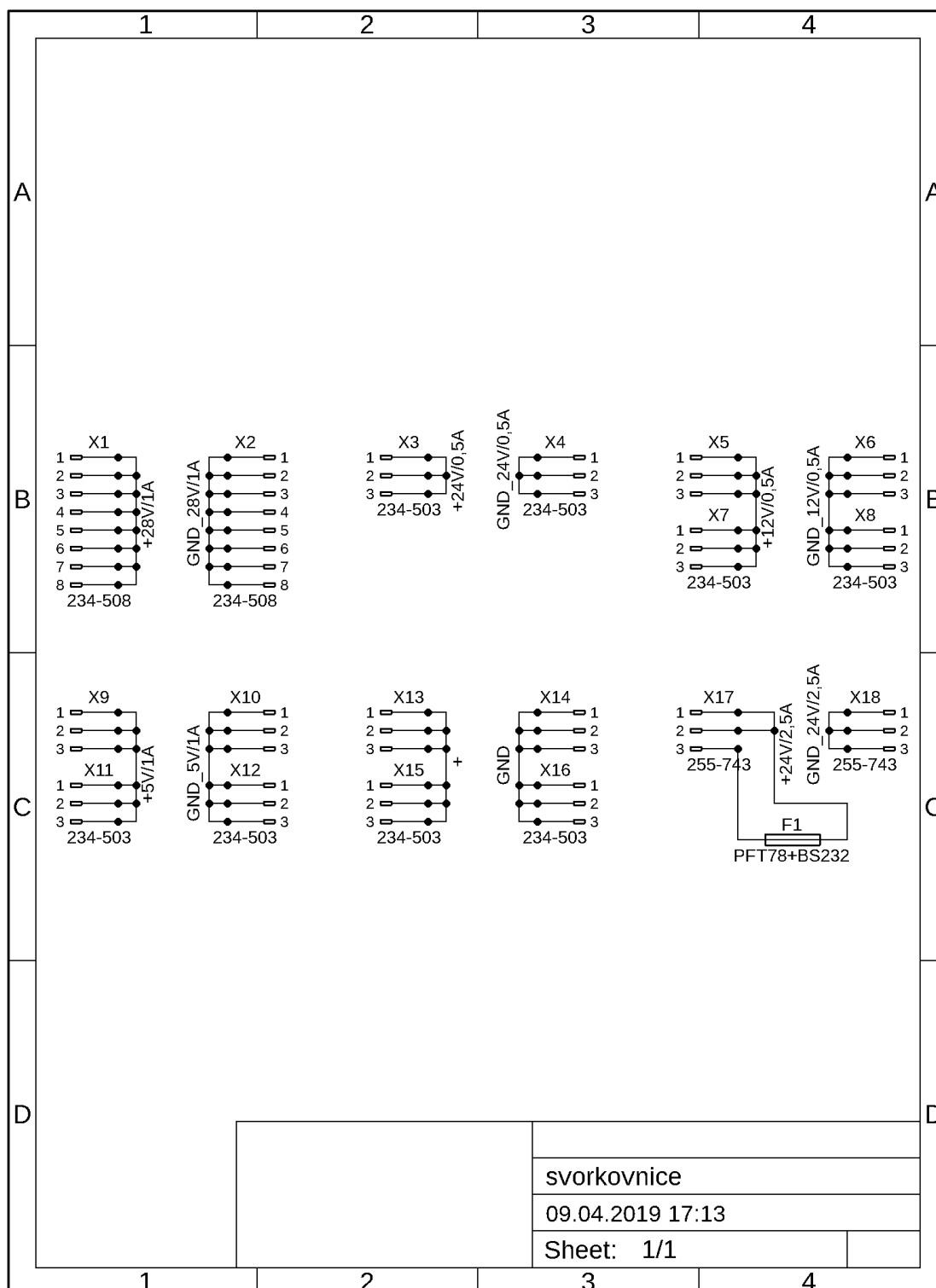
Měřítko M 1:1

A.12 Zdroj $\pm 3,3$ V – osazovací výkres – top

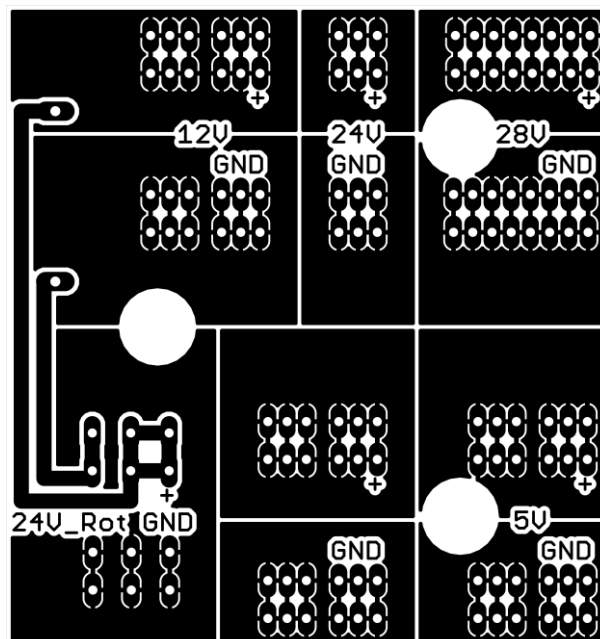


Měřítko M 1:1

A.13 Svorkovnice – obvodové zapojení

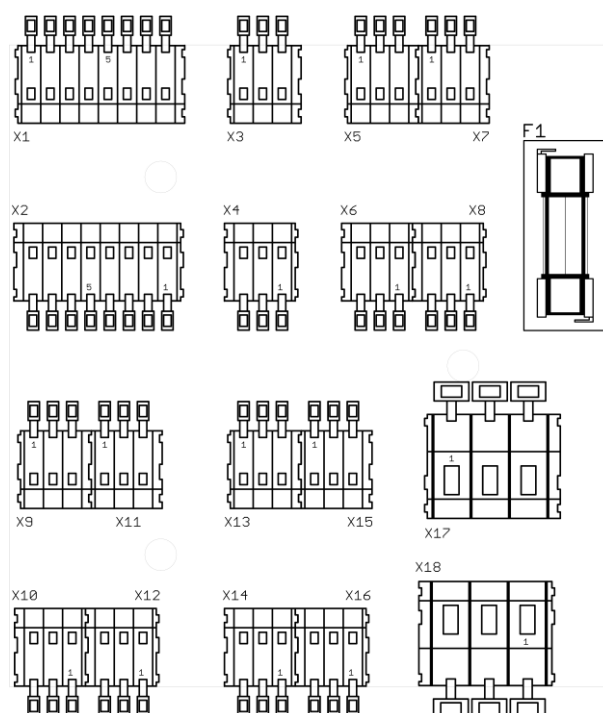


A.14 Svorkovnice – deska plošného spoje – bottom



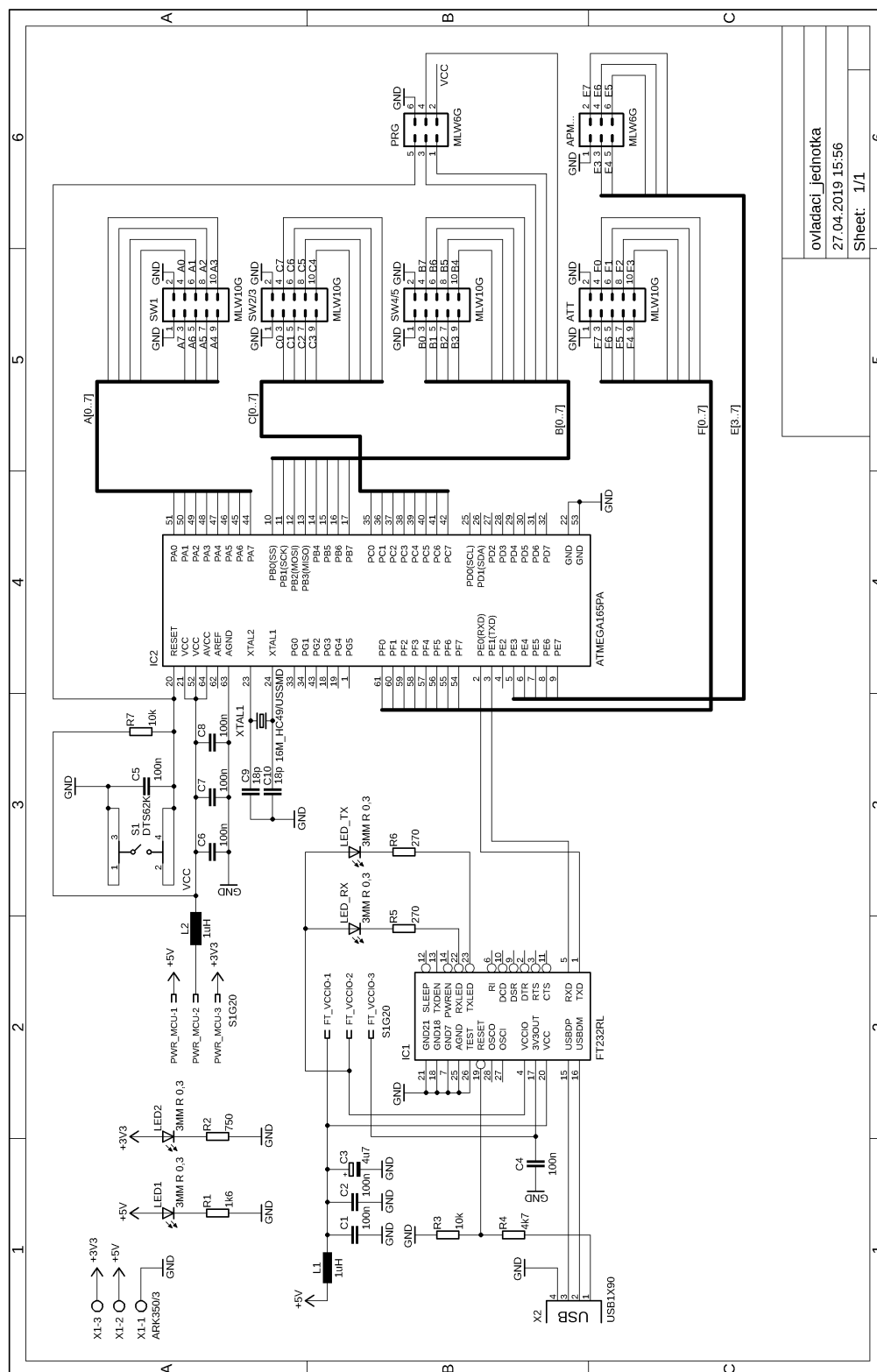
Rozměr desky 80 × 85 [mm], měřítko M 1:1

A.15 Svorkovnice – osazovací výkres – top

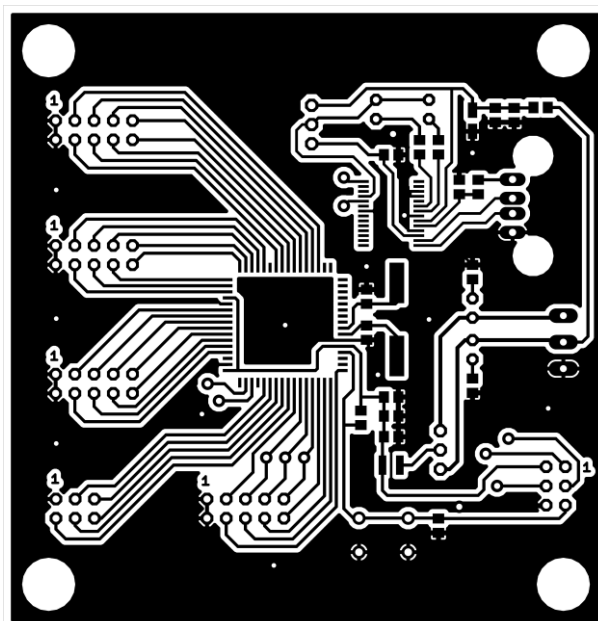


Měřítko M 1:1

B.1 Ovládací jednotka – obvodové zapojení

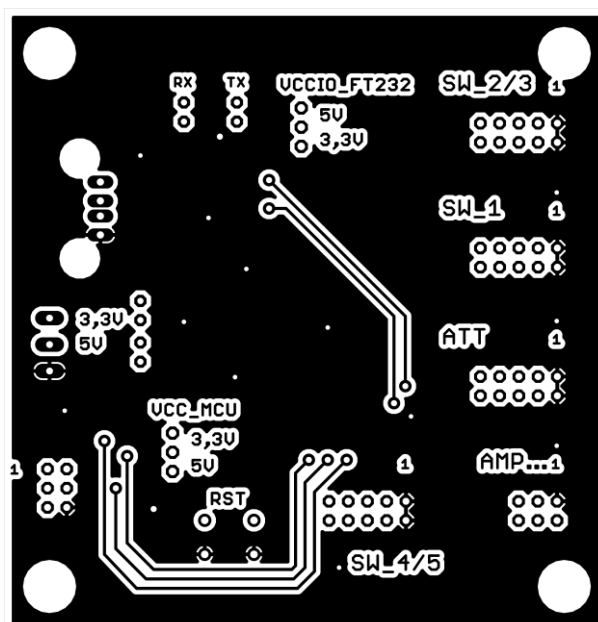


B.2 Ovládací jednotka – deska plošného spoje – bottom



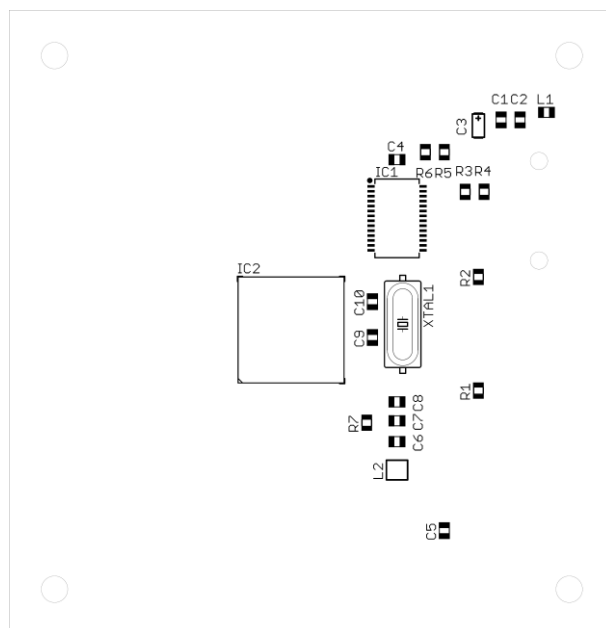
Rozměr desky $80 \times 82,5$ [mm], měřítko M 1:1

B.3 Ovládací jednotka – deska plošného spoje – top



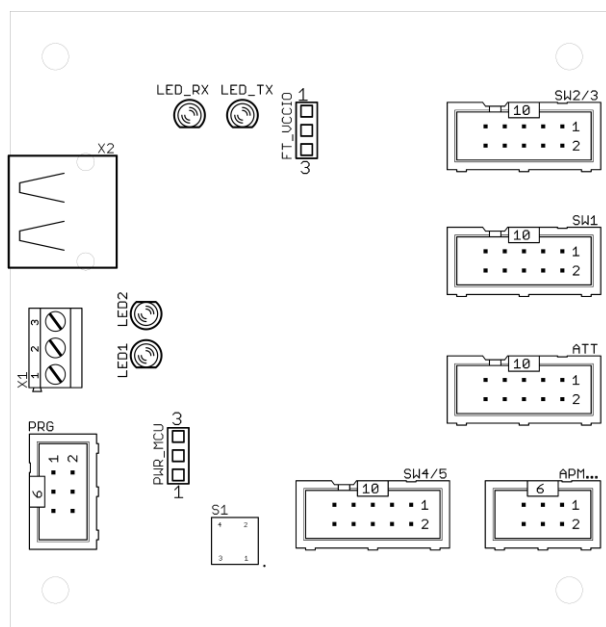
Rozměr desky $80 \times 82,5$ [mm], měřítko M 1:1

B.4 Ovládací jednotka – osazovací výkres – bottom



Měřítko M 1:1

B.5 Ovládací jednotka – osazovací výkres – top



Měřítko M 1:1

B.6 Seznam příkazů pro ovládání rotátoru

CMD	Meaning
C	Return Azimuth Angle
C2	Return Elevation Angle
CB	Return Azimuth and Elevation ADC Values (0-1023)
R	Activate RIGHT Relay (Clockwise rotation)
L	Activate LEFT Relay (Counter Clockwise rotation)
U	Activate UP Relay (Up Direction rotation)
D	Activate DOWN Relay (Down Direction rotation)
S	Stop all rotation (Azimuth & Elevation relays)
A	Stop Azimuth rotation
E	Stop Elevation rotation
Mxxx	Antenna Direction Setting (xxx = Azimuth angle). Example: M025
Nyyy	Antenna Direction Setting (yyy = Elevation angle). Example: N025
Wxxx yyy	Antenna Direction Setting (xxx = Azim. Angle; yyy = Elev. Angle). Example: W350 163
X	Trace ON/OFF. Enable/Disable trace messages
FW	Write or Save calibration parameters to EEPROM
FR	Read parameters from EEPROM
FS	Show calibration parameters
FBxx	Set the Brake delay to xx (1/10 seconds) Example: FB12 (Delay to 1.2 seconds)
FAS	Set azimuth START Limit
FAE	Set azimuth END Limit
FAOxxx	Azimuth OFFSET Setting (xxx = Azimuth Offset). Example: FAO000
FAAxxx	Azimuth ROTATION ANGLE Setting (xxx = Rotation Setting). Example: FAA450
FARxxx	Azimuth RESOLUTION Setting (xxx = Resolution Setting). Example: FAR005
FATxxx	Azimuth RETRY Setting (xxx = Retry Setting). Example: FAT010
FES	Set elevation START Limit
FEE	Set elevation END Limit
FEOyyy	Elevation OFFSET Setting (yyy = Elevation Offset). Example: FEO000
FEAyyy	Elevation ROTATION ANGLE Setting (yyy = Rotation Setting). Example: FEA180
FERyyy	Elevation RESOLUTION Setting (yyy = Resolution Setting). Example: FER010
FETyyy	Elevation RETRY Setting (yyy = Retry Setting). Example: FET005

- **Control and Requesting** Commands
- **Appointment** Commands
- **Calibration** Commands

B.7 Seznam příkazů pro ovládání VF jednotky

<i>Příkaz</i>	<i>Popis</i>
ANT1	Výběr antény připojené na port 1 prvního koaxiálního přepínače.
ANT2	Výběr antény připojené na port 2 prvního koaxiálního přepínače.
ANT3	Výběr antény připojené na port 3 prvního koaxiálního přepínače.
ANT4	Výběr antény připojené na port 4 prvního koaxiálního přepínače.
ANTOFF	Nepropojen COM port s výstupy.

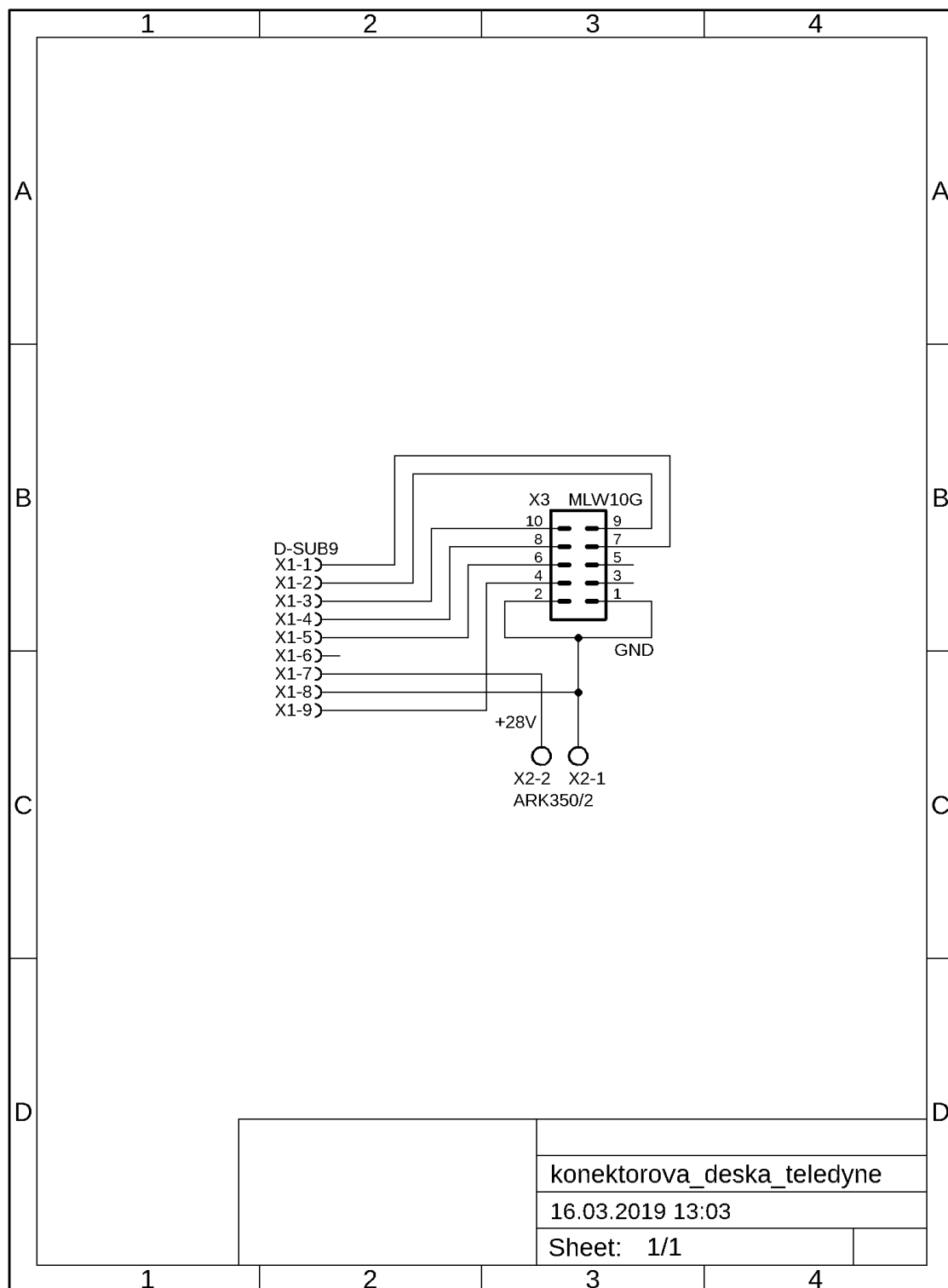
<i>Příkaz</i>	<i>Připojený filtr</i>	<i>Popis</i>
FILT1	Dolní propust 1 GHz	Výběr filtru připojeného mezi porty 1 druhého a třetího koaxiálního přepínače.
FILT2	Horní propust 1,1 GHz	Výběr filtru připojeného mezi porty 2 druhého a třetího koaxiálního přepínače.
FILT3	Pásmová zadrž VKV-FM	Výběr filtru připojeného mezi porty 3 druhého a třetího koaxiálního přepínače.
FILT4	Pásmová zadrž LTE 800/GSM 900	Výběr filtru připojeného mezi porty 4 druhého a třetího koaxiálního přepínače.
FILT5	Přímé propojení	Výběr filtru připojeného mezi porty 5 druhého a třetího koaxiálního přepínače.
FILT6	Rezerva	Výběr filtru připojeného mezi porty 6 druhého a třetího koaxiálního přepínače.
FILTOFF	Nepropojen COM port s výstupy.	

<i>Příkaz</i>	<i>Zařízení</i>	<i>Popis</i>
AA1	Zesilovač	Výběr zařízení připojeného mezi porty 1 čtvrtého a pátého koaxiálního přepínače.
AA2	Atenuátor	Výběr zařízení připojeného mezi porty 2 čtvrtého a pátého koaxiálního přepínače.
AA3	Přímé propojení	Výběr zařízení připojeného mezi porty 3 čtvrtého a pátého koaxiálního přepínače.
AA4	Rezerva	Výběr zařízení připojeného mezi porty 4 čtvrtého a pátého koaxiálního přepínače.
AAOFF	Nepropojen COM port s výstupy.	

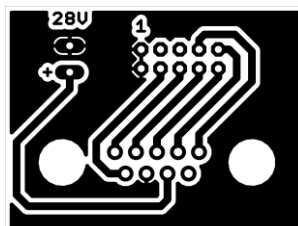
<i>Příkaz</i>	<i>Zařízení</i>	<i>Popis</i>
SETATT_{xx}	Atenuátor	Nastavení útlumu atenuátoru, <i>xx</i> se nahradí hodnotou útlumu v dB a to od 0 dB do 55 dB s krokem 1 dB. Př.: Útlum 5 dB – SETATT5 Útlum 25 dB – SETATT25

C ÚPRAVA A VEDENÍ SIGNÁLU

C.1 Konektorová deska pro koaxiální přepínač Teledyne – obvodové zapojení

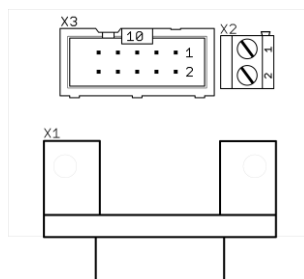


C.2 Konektorová deska pro koaxiální přepínač Teledyne – deska plošného spoje – bottom



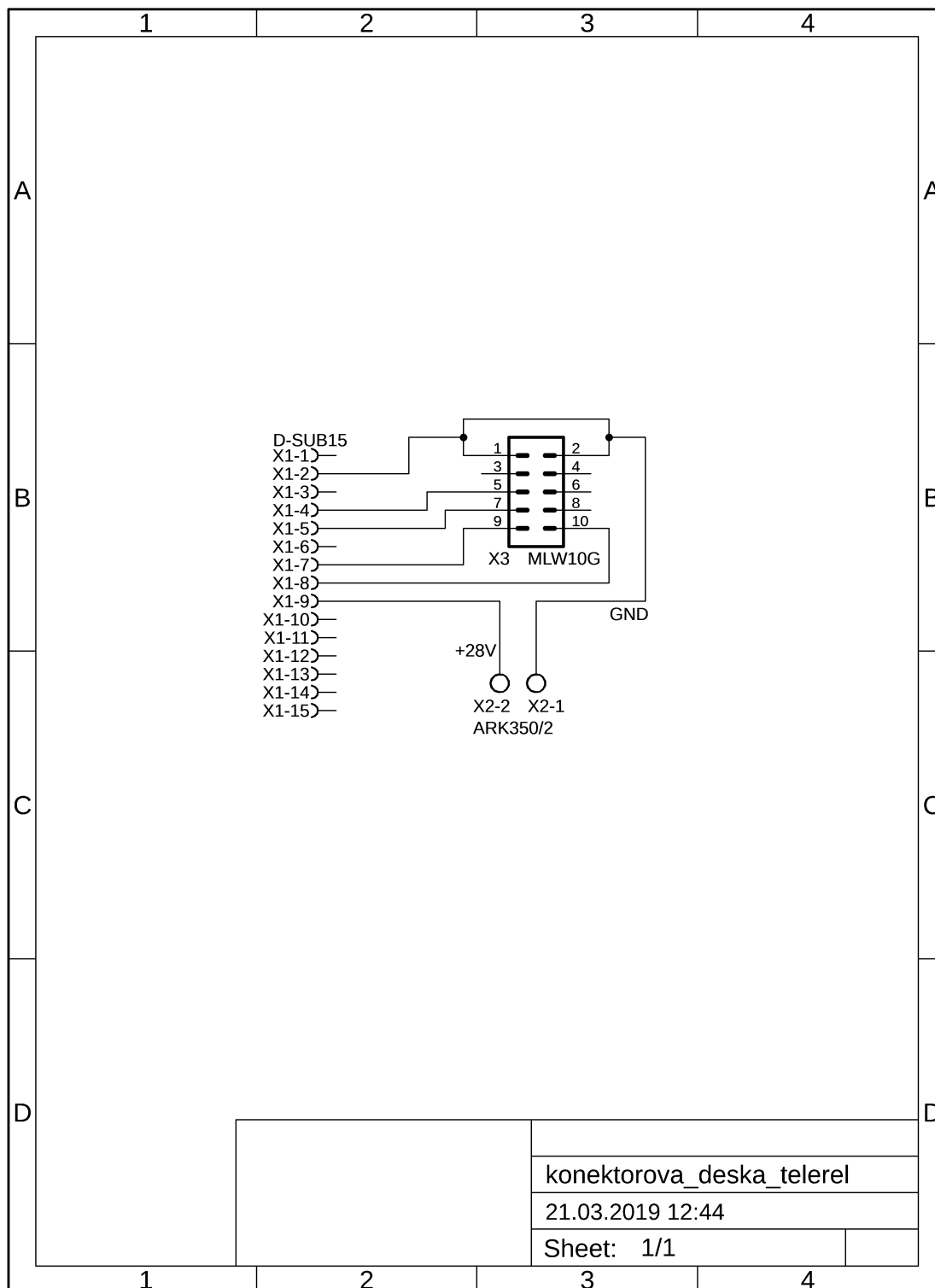
Rozměr desky 40×30 [mm], měřítko M 1:1

C.3 Konektorová deska pro koaxiální přepínač Teledyne – osazovací výkres – top

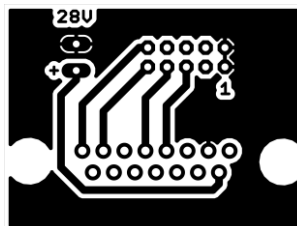


Měřítko M 1:1

C.4 Konektorová deska pro koaxiální přepínač TEleRel – obvodové zapojení

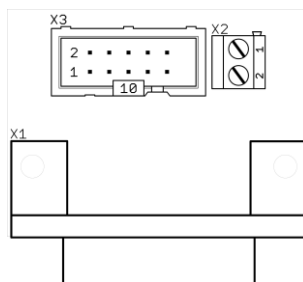


C.5 Konektorová deska pro koaxiální přepínač TEleRel – deska plošného spoje – bottom



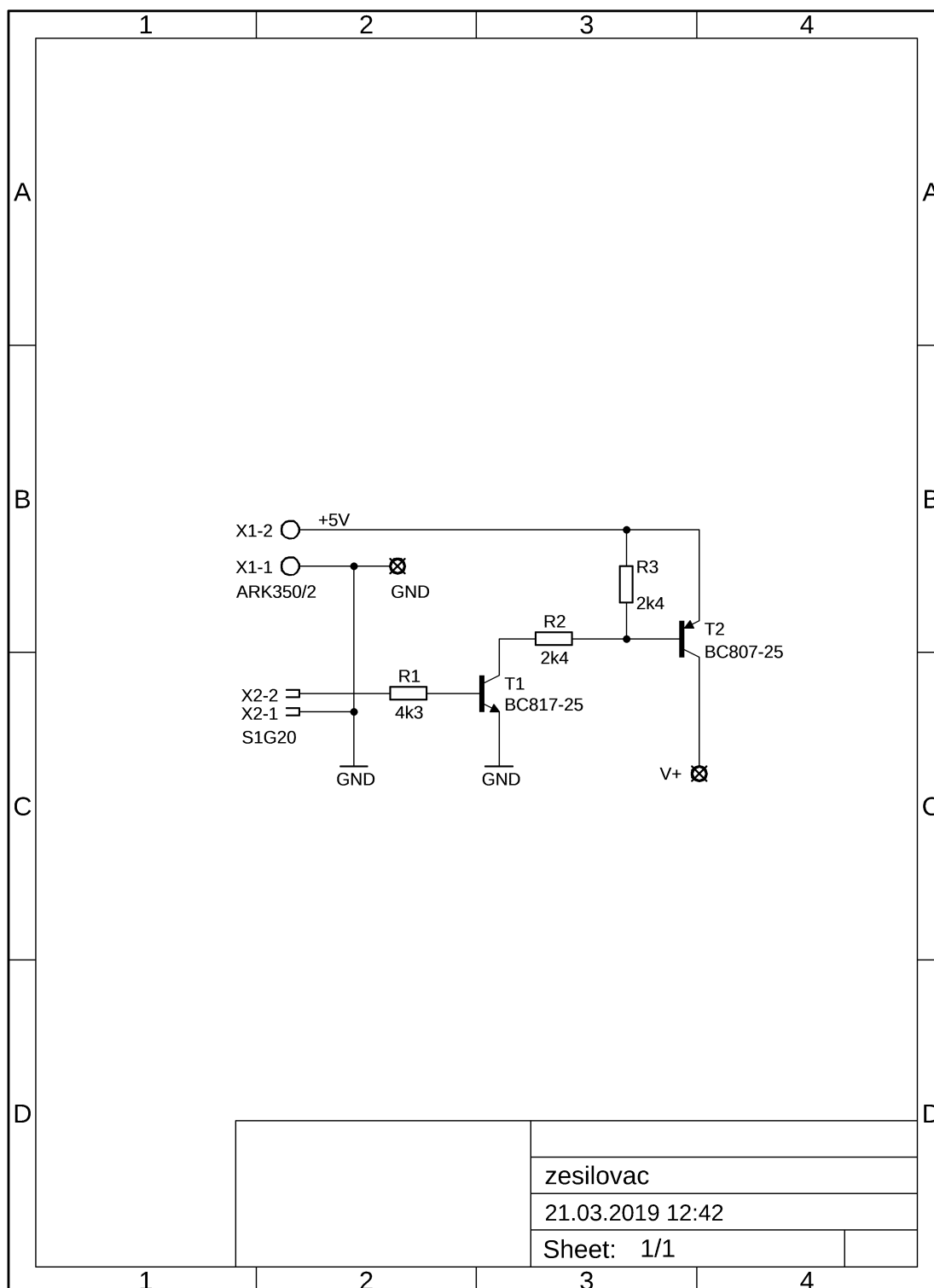
Rozměr desky 40×30 [mm], měřítko M 1:1

C.6 Konektorová deska pro koaxiální přepínač TEleRel – osazovací výkres – top

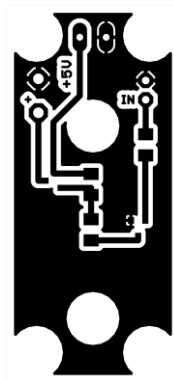


Měřítko M 1:1

C.7 Zesilovač – obvodové zapojení

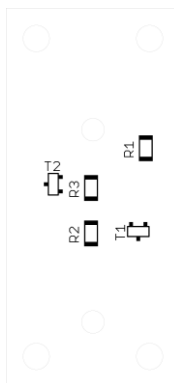


C.8 Zesilovač – deska plošného spoje – bottom



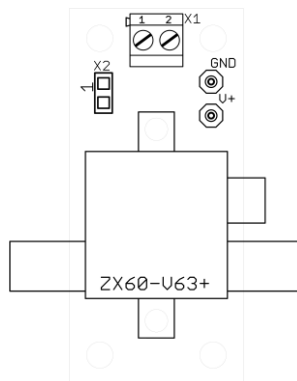
Rozměr desky 23×50 [mm], měřítko M 1:1

C.9 Zesilovač – osazovací výkres – bottom



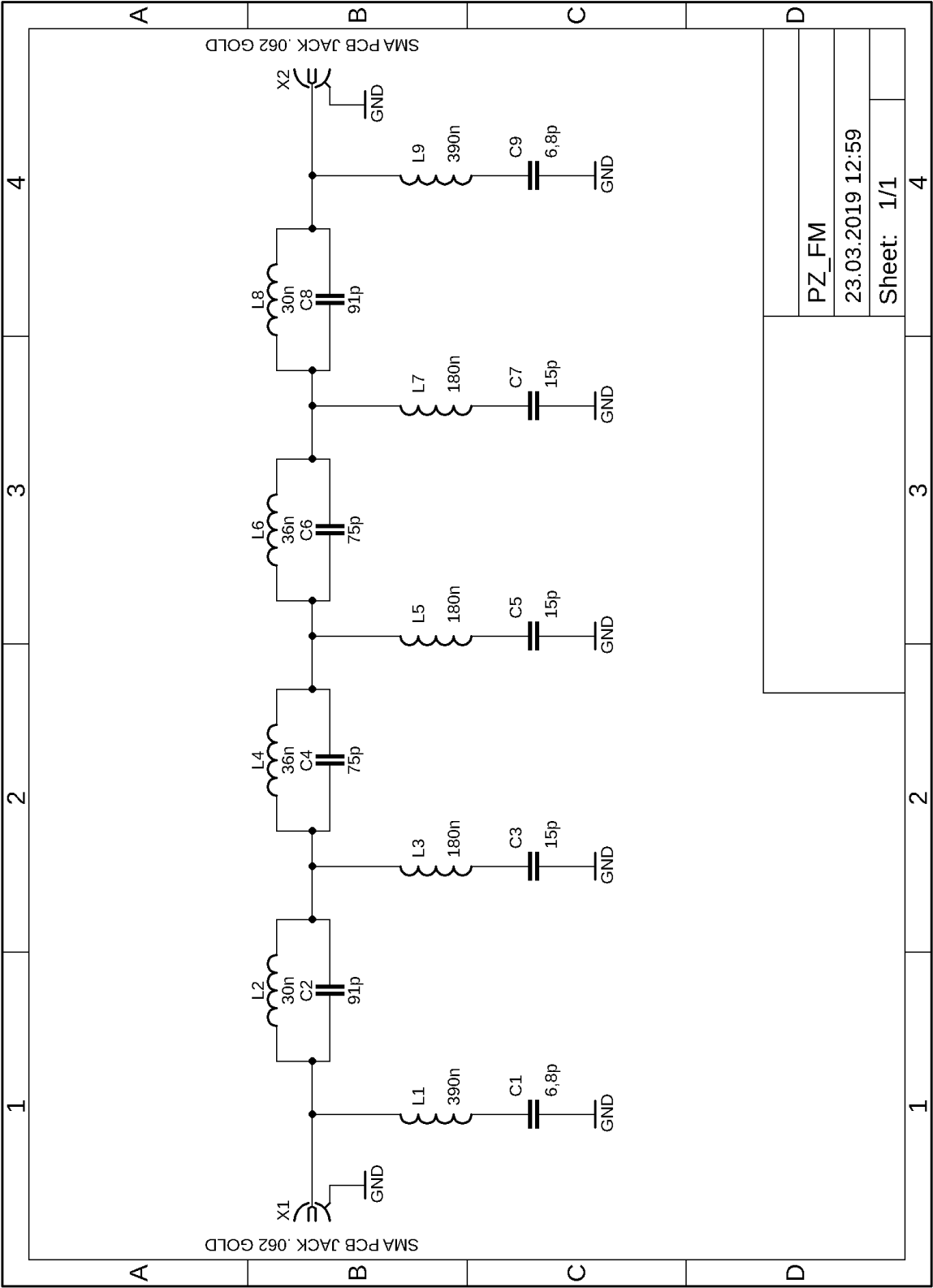
Měřítko M 1:1

C.10 Zesilovač – osazovací výkres – top

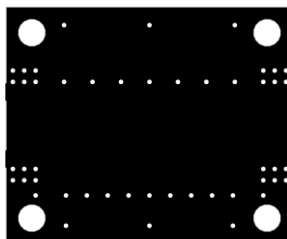


Měřítko M 1:1

C.11 Pásmová zadrž VKV-FM – obvodové zapojení

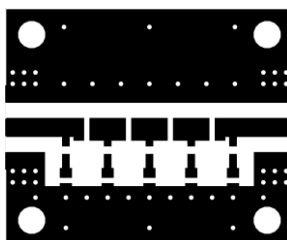


C.12 Pásmová zadrž VKV-FM – deska plošného spoje – bottom



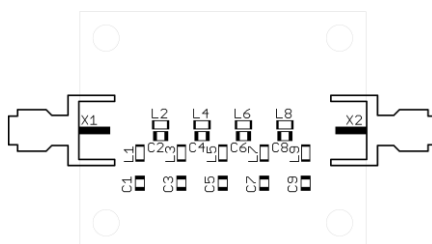
Rozměr desky $38 \times 31,5$ [mm], měřítko M 1:1

C.13 Pásmová zadrž VKV-FM – deska plošného spoje – top



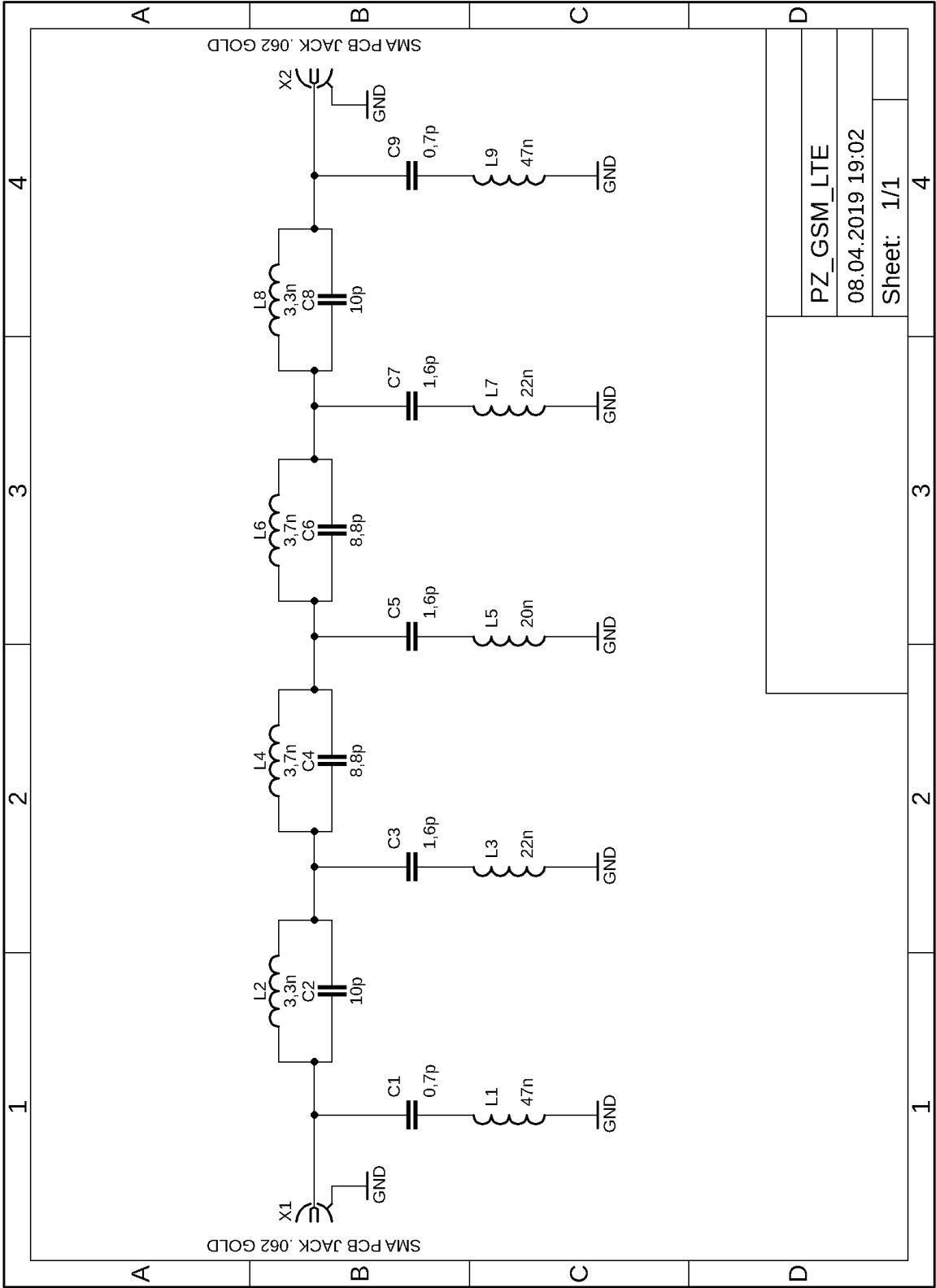
Rozměr desky $38 \times 31,5$ [mm], měřítko M 1:1

C.14 Pásmová zadrž VKV-FM – osazovací výkres – top

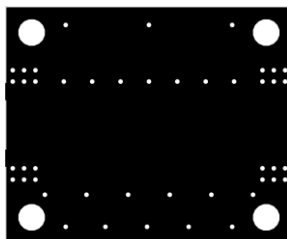


Měřítko M 1:1

C.15 Pásmová zadrž LTE 800 a GSM 900 – obvodové zapojení

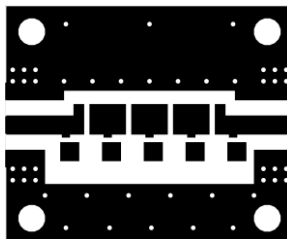


C.16 Pásmová zádrž LTE 800 a GSM 900 – deska plošného spoje – bottom



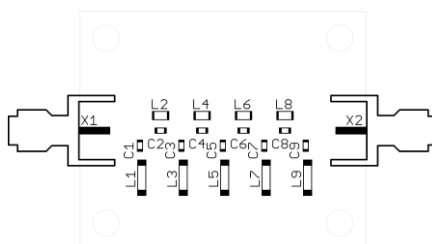
Rozměr desky $38 \times 31,5$ [mm], měřítko M 1:1

C.17 Pásmová zádrž LTE 800 a GSM 900 – deska plošného spoje – top



Rozměr desky $38 \times 31,5$ [mm], měřítko M 1:1

C.18 Pásmová zádrž LTE 800 a GSM 900 – osazovací výkres – top



Měřítko M 1:1

D MECHANICKÉ A KONSTRUKČNÍ ČÁSTI

D.1 Přídavné chladiče pro napájecí zdroj 5 V, 12 V, 24 V a 28 V

Viz výkres PŘÍDAVNÉ CHLADIČE PRO NAPÁJECÍ ZDROJ na další stránce.

D.2 Krabice pro filtr dolní propust 1 GHz

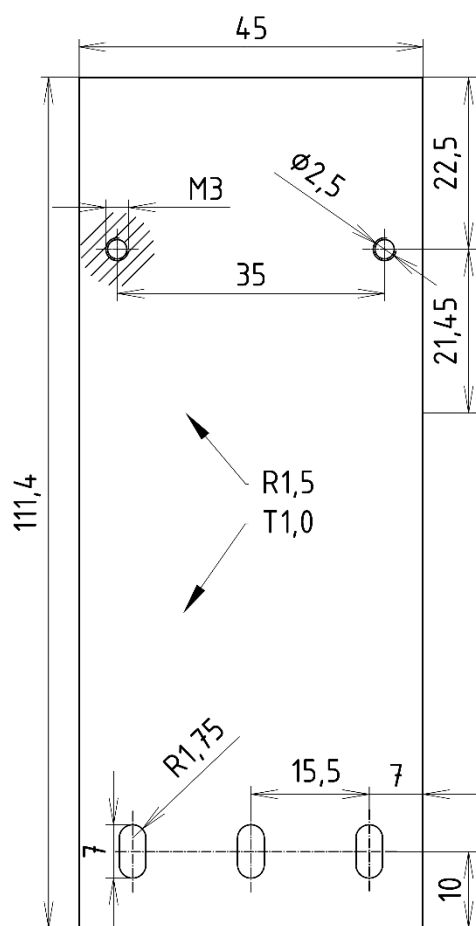
Viz výkres KRABICE PRO FILTR DOLNÍ PROPUST 1 GHZ na další stránce.

D.3 Krabice pro filtr horní propust 1,1 GHz

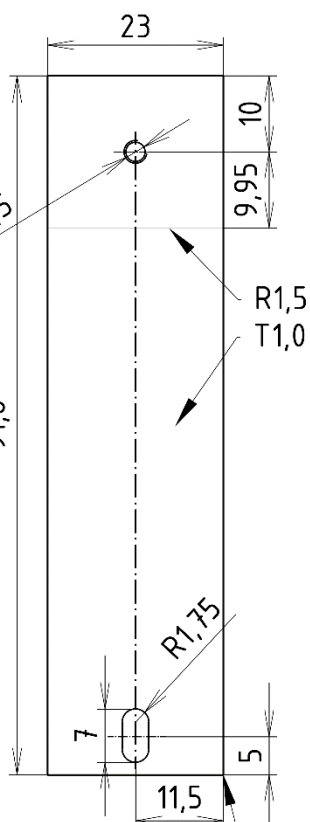
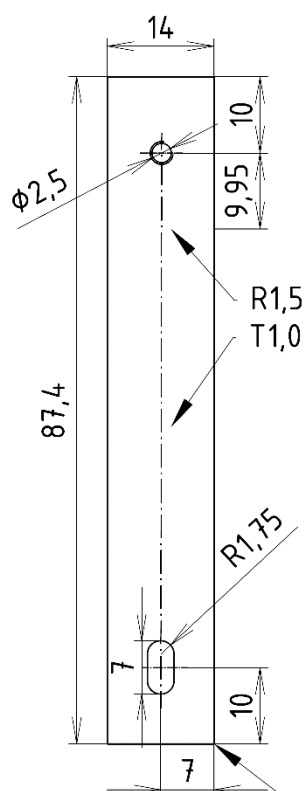
Viz výkres KRABICE PRO FILTR HORNÍ PROPUST 1,1 GHZ na další stránce.

D.4 Krabice pro filtr pásmová zádrž LTE 800 a GSM 900

Viz výkres KRABICE PRO FILTR PÁSMOVÁ ZÁDRŽ LTE/GSM na další stránce.



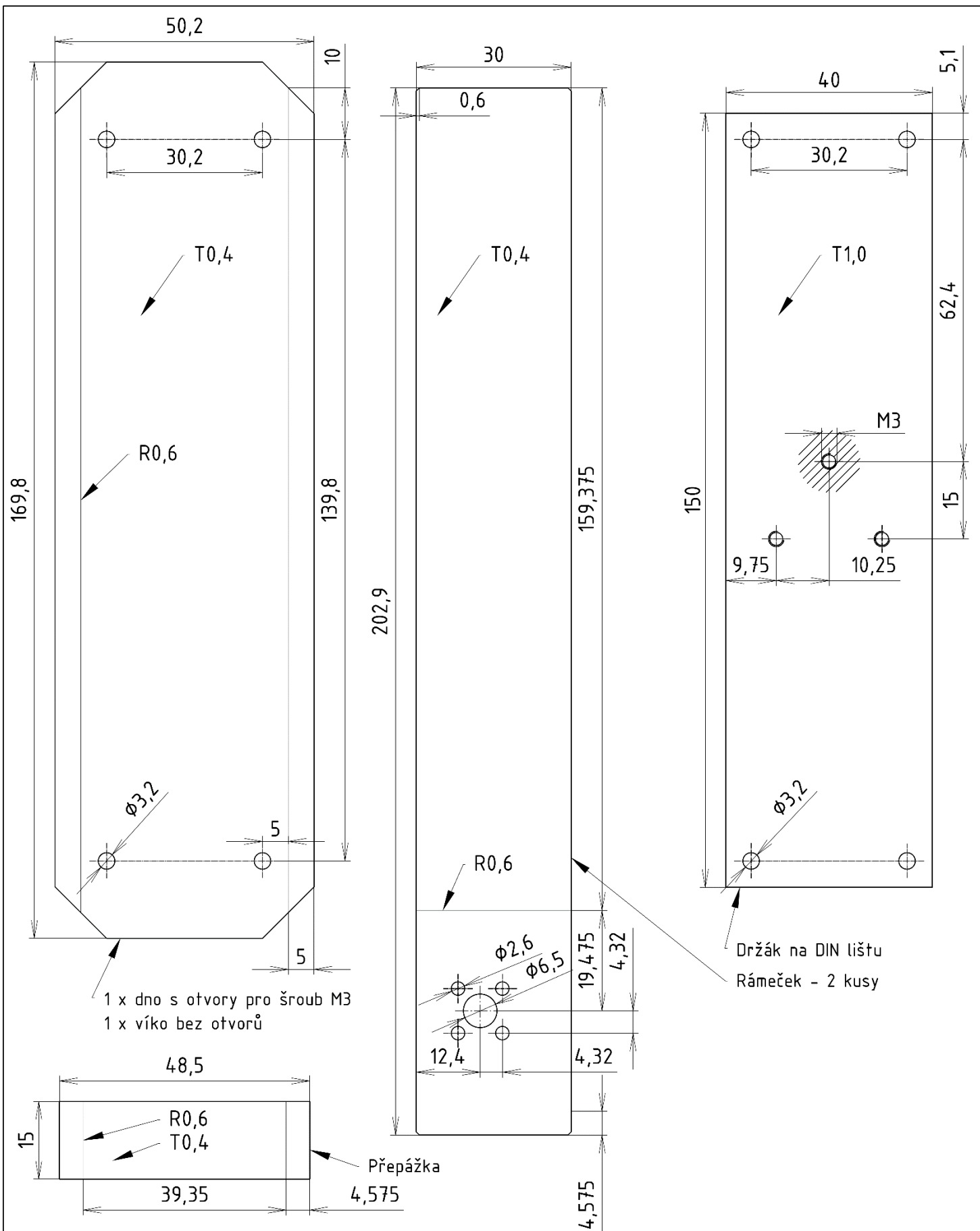
č. 1



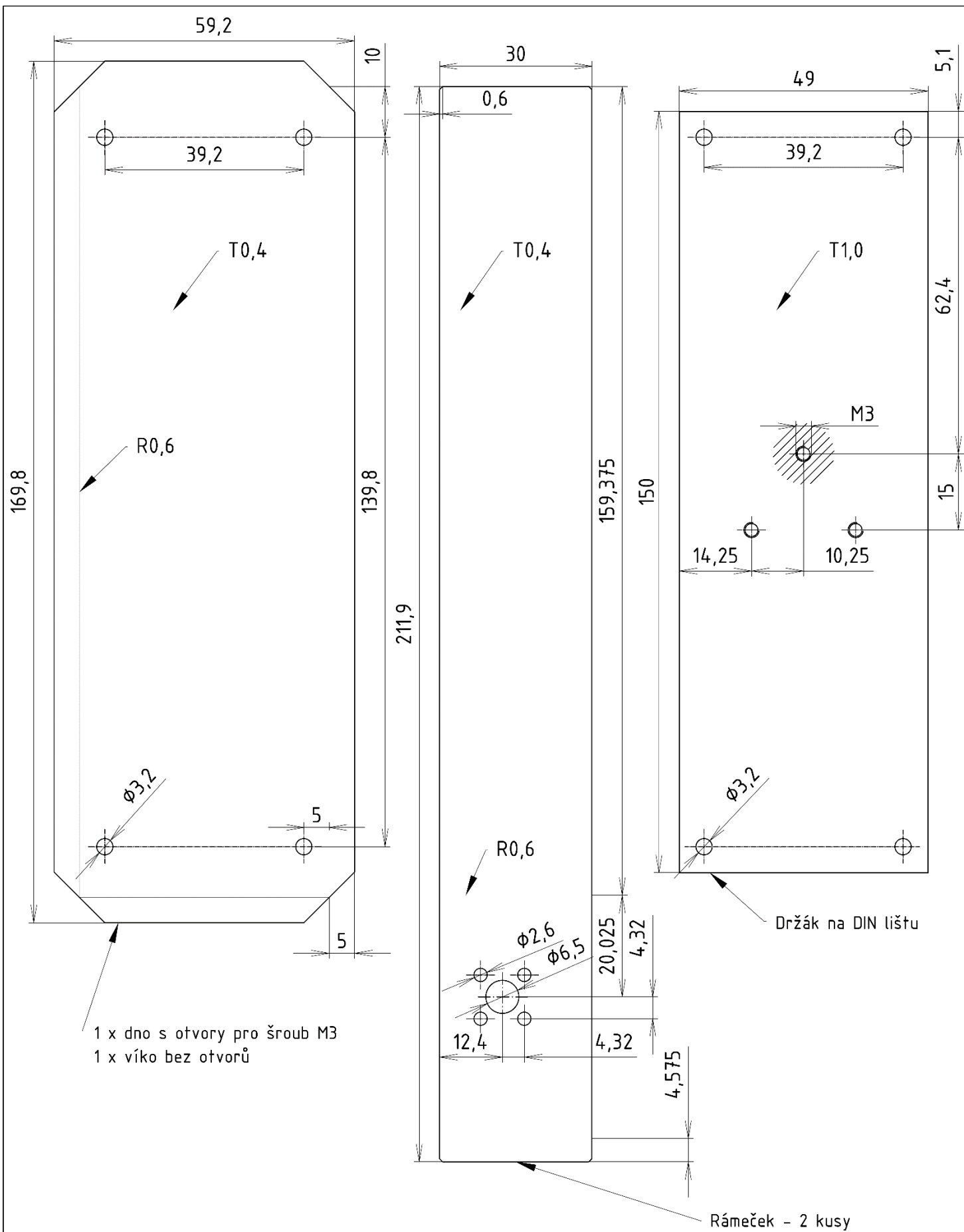
č. 2

č. 3

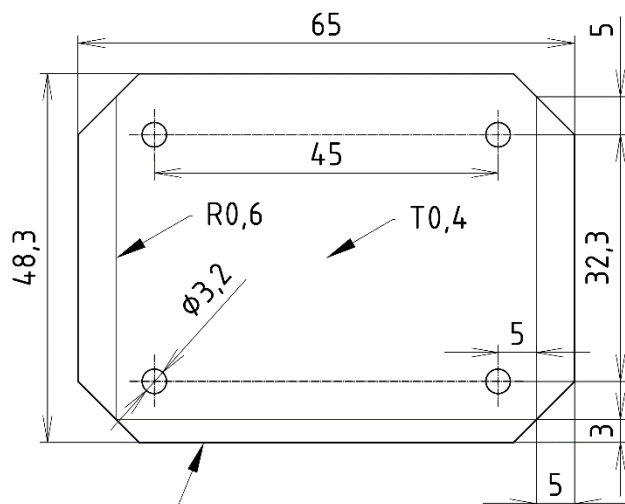
	<p>NÁZEV: TYP:</p> <p>PŘÍDAVNÉ CHLADIČE PRO NAPÁJECÍ ZDROJ</p> <p>ČÍSLO VÝKRESU: TECHNOL. Č.</p> <p>LISTŮ: 1 LIST: 1</p>
--	--



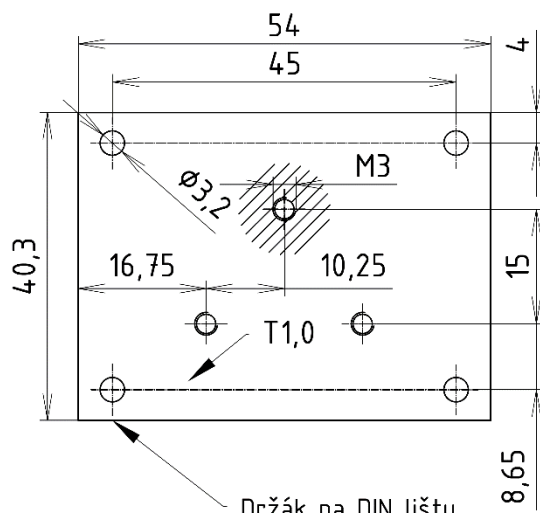
	<p>NÁZEV</p> <p>TYP:</p> <p>KRABICE PRO FILTR DOLNÍ PROPUST 1 GHZ</p>
	<p>ČÍSLO VÝKRESU</p> <p>TECHNOL. Č.</p>
<p>LISTŮ: 1</p>	<p>LIST: 1</p>



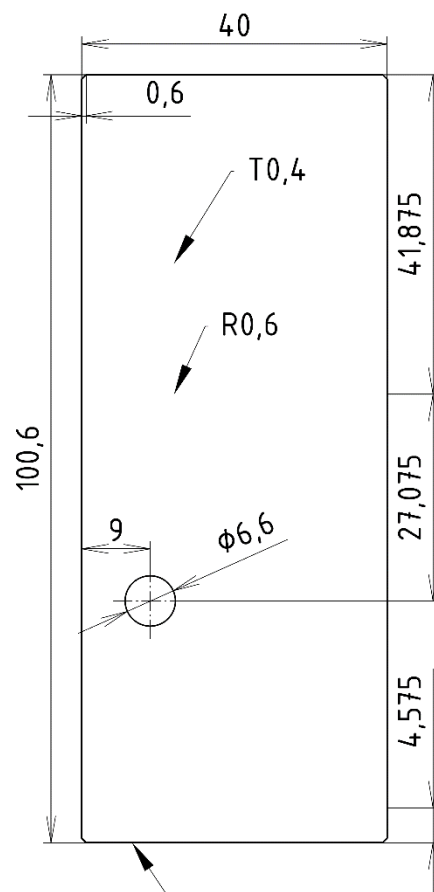
	<p>NÁZEV</p> <p>TYP:</p> <p>KRABICE PRO FILTR HORNÍ PROPUST 1,1 GHZ</p>
	<p>ČÍSLO VÝKRESU</p> <p>TECHNOL. Č.</p> <p>LISTŮ: 1</p> <p>LIST: 1</p>



1 x dno s otvory pro šroub M3
1 x víko bez otvorů



Držák na DIN lištu



Rámeček - 2 kusy

	<p>NÁZEV: KRABICE PRO FILTR PÁSMOVÁ ZÁDRŽ LTE/GSM</p> <p>TYP:</p>
	<p>ČÍSLO VÝKRESU: 1</p> <p>TECHNOL. Č.:</p>

E SEZNAM SOUČÁSTEK

E.1 Napájení

Tabulka E.1 Seznam součástek – zdroj 5 V, 12 V, 24 V a 28 V.

Označení	Hodnota	Popis
B1	UD3KB100-BP	Usměrňovací můstek 3 A
B2	DB153G	Usměrňovací můstek 1,5 A
B3	DB153G	Usměrňovací můstek 1,5 A
B4	DB103G	Usměrňovací můstek 1 A
B5	DB103G	Usměrňovací můstek 1 A
C1, C2	4700 μ F/35 V	Low ESR elektrolytický kondenzátor – radiální 18 mm \times 40 mm
C3, C4	2200 μ F/50 V	Low ESR elektrolytický kondenzátor – radiální 16 mm \times 32 mm
C5	100 nF/50 V	Keramický kondenzátor SMD 1206 X7R
C6	10 μ F/35 V	Elektrolytický kondenzátor – radiální 6,3 mm \times 8 mm
C7, C12, C13, C16, C17, C20, C21	100 nF/50 V	Keramický kondenzátor SMD 1206 X7R
C8	22 μ F/35 V	Elektrolytický kondenzátor – radiální 6,3 \times 8 mm
C9 – C11	2200 μ F/16 V	Low ESR elektrolytický kondenzátor – radiální 12,5 mm \times 20 mm
C14, C15	2200 μ F/35 V	Low ESR elektrolytický kondenzátor – radiální 12,5 mm \times 35,5 mm
C18, C19	2200 μ F/25 V	Low ESR elektrolytický kondenzátor – radiální 12,5 mm \times 30 mm
D1, D2	1N4002-E3/73	Usměrňovací dioda 1 A/100 V
IC1	LM338T	Lineární regulátor napětí – nastavitelný 1,2 – 32 V/5 A – TO-220-3
IC2	MC7805ABTG	Lineární regulátor napětí – pevný 5 V/ 1 A – TO-220-3
IC3	MC78M24BTG	Lineární regulátor napětí – pevný 24 V/ 0,5 A – TO-220-3
IC4	MC78M12BTG	Lineární regulátor napětí – pevný 12 V/ 0,5 A – TO-220-3
R1	120 Ω /0,1 W	Tenkovrstvý rezistor – axiální 2,29 mm \times 6,1 mm
R2	2,2 k Ω /0,1 W	Tenkovrstvý rezistor – axiální 2,29 mm \times 6,1 mm
R3	500 Ω /0,1 W	Trimer – horizontální 6,3 mm \times 3,5 mm
TR1	100 VA	Transformátor EI 78 \times 40 – zalitý do DPS; P: 230 V/ 50 Hz; S1: 18 V/ 2,5 A; S2: 7 V/1 A a 24 V/1 A; S3: 12 V/0,5 A a 20 V/0,5 A
X1	ARK500/2 B	Šroubovací svorkovnice vertikální do DPS modrá – 2 kontakty

X2, X4, X6, X8, X10	PSH02-02P	Konektor se zámkem do DPS – 2 kontakty, vertikální
X3, X5, X7, x9, X11	AK500/2DS-5.0-V-GREY	Šroubovací svorkovnice vertikální do DPS šedá – 2 kontakty
Součástky neuvedené ve schématu		
4 ks	Chladič Al pro TO-220 – 20 K/W – 13,2 mm × 12,7 mm × 19,5 mm + spojovací materiál a izolační podložky	
1 ks	Chladič Al pro D3K-4 – 21,5 K/W – 19,1 mm × 9,7 mm × 19,1 mm + spojovací materiál	
3 ks	Přídavné chladiče z Al plechu 1 mm, viz příloha D.1 + spojovací materiál	
1 ks	Krabice z Al plechu 1 mm 210 mm × 85 mm × 112 mm + spojovací materiál	
1 ks	Pojistkové pouzdro pro pojistky 5 × 20 mm – montáž do panelu	
1 ks	Pojistka 5 × 20 mm T500 mA/ 250 V	
2 ks	Faston konektor female 6,35 mm × 0,81 mm	
2 ks	Faston konektor female 4,75 mm × 0,81 mm	
1 m*	Lanko Cu 0,5 mm ² , izolace PVC – modré	
1 m*	Lanko Cu 0,5 mm ² , izolace PVC – hnědé	

* Délky jsou pouze orientační, skutečná délka závisí na trase vodiče a umístění zařízení.

Tabulka E.2 Seznam součástek – zdroj ±3,3 V.

Označení	Hodnota	Popis
C1, C2	10 µF/ 10 V	Keramický kondenzátor SMD 0805 X5R
C3, C4	1 µF/ 10 V	Keramický kondenzátor SMD 0805 X7R
IC1	NTA0505MC	Oddělený měnič stejnosměrného napětí ±3,3 V/ 100 mA
IC2	XC6206P332MR-G	Lineární regulátor napětí s nízkým úbytkem – pevný 3,3 V/ 0,2 A – SMD SOT-23-3
IC3	XC6902N331MR-G	Lineární regulátor napětí s nízkým úbytkem – pevný -3,3 V/ 0,2 A – SMD SOT-23-3
L1, L2	10 µH	Cívka SMD 1210
LED1, LED2	TLLG4401	LED dioda 3 mm – zelená, 2 mA
R1, R2	680 Ω	Tenkovrstvý rezistor – SMD 0805
X1	PSH02-02W	Konektor se zámkem do DPS – 2 kontakty, horizontální
X2	ARK350/3 Blue	Šroubovací svorkovnice vertikální do DPS modrá – 3 kontakty
Součástky neuvedené ve schématu		
4 ks	Distanční sloupek kovový (nikl) M2,5-10 mm (matice/matice) + spojovací materiál	
2 ks	Konektor se zámkem na kabel PFH02-02P – 2 kontakty	
4 ks	Kontakty pro PFH02-02P	
0,05 m*	Lanko Cu 0,14 mm ² , izolace PVC – černé	
0,05 m*	Lanko Cu 0,14 mm ² , izolace PVC – červené	

* Délky jsou pouze orientační, skutečná délka závisí na trase vodiče a umístění zařízení.

Tabulka E.3 Seznam součástek – zdroj 5 V.

Označení	Hodnota	Popis
C1, C2	100 nF/50 V	Keramický kondenzátor SMD 1206 X7R
IC1	MC78M05	Lineární regulátor napětí – pevný 5 V/ 0,5 A – TO-220-3
X1	PSH02-02P	Konektor se zámkem do DPS – 2 kontakty, vertikální
X2	AK500/2DS-5.0-V-GREY	Šroubovací svorkovnice vertikální do DPS šedá – 2 kontakty
Součástky neuvedené ve schématu		
1 ks	Chladič žebrový jednostranný pro TO220 – 9,5 K/W – 50 mm × 29 mm × 11,5 mm – Al eloxovaný + spojovací materiál	
4 ks	Distanční sloupek kovový (nikl) M2,5-15 mm (matice/matice) + spojovací materiál	
2 ks	Konektor se zámkem na kabel PFH02-02P – 2 kontakty	
4 ks	Kontakty pro PFH02-02P	
0,1 m*	Lanko Cu 0,14 mm ² , izolace PVC – černé	
0,1 m*	Lanko Cu 0,14 mm ² , izolace PVC – červené	

* Délky jsou pouze orientační, skutečná délka závisí na trase vodiče a umístění zařízení.

Tabulka E.4 Seznam součástek – svorkovnice.

Označení	Hodnota	Popis
F1	PTF78+BS232	Pojistkové pouzdro pro pojistky 5 × 20 mm – montáž do DPS
X1, X2	WAGO 234-508	Pružinová svorkovnice do DPS – 8 kontaktů, oranžová
X3 – X16	WAGO 234-503	Pružinová svorkovnice do DPS – 3 kontakty, oranžová
X17, X18	WAGO 255-743	Pružinová svorkovnice do DPS – 1 kontakt, světle šedá (spojené 3 kusy)
Součástky neuvedené ve schématu		
1 ks	Pojistka 5 × 20 mm F2,5 A/ 250 V	
5 m*	Lanko Cu 0,14 mm ² , izolace PVC – černé	
5 m*	Lanko Cu 0,14 mm ² , izolace PVC – červené	
1 m*	Lanko Cu 0,5 mm ² , izolace PVC – černé	
1 m*	Lanko Cu 0,5 mm ² , izolace PVC – červené	
1 m*	Lanko Cu 1,0 mm ² , izolace PVC – černé	
1 m*	Lanko Cu 1,0 mm ² , izolace PVC – červené	
3 ks	Distanční sloupek kovový (nikl) M3-5 mm (matice/matice) + spojovací materiál	
1 ks	Držák na DIN lištu	

* Délky jsou pouze orientační, skutečná délka závisí na trase vodiče a umístění zařízení.

E.2 Ovládací jednotka

Tabulka E.5 Seznam součástek – ovládací jednotka.

Označení	Hodnota	Popis
C1, C2, C4 – C8	100 nF/50 V	Keramický kondenzátor SMD 0805 X7R
C3	4,7 μ F/16 V	Tantalový kondenzátor SMD A
C9, C10	18 pF/50 V	Keramický kondenzátor SMD 0805 NPO
IC1	FT232RL	Převodník USB \leftrightarrow RS232, SMD pouzdro SSOP-28
IC2	ATmega 165PA-AU	Mikrokontrolér 8bitový – 16 kB FLASH, 512 B EE, 1 kB SRAM, SMD pouzdro TQFP-64
L1	1 μ H / 0,092 A	Tlumivka SMD 0805
L2	1 μ H / 0,8 A	Tlumivka SMD 1210
LED_RX, LED_TX, LED1, LED2	LED 3MM RED 0,3/35° BL-B5141-L	LED dioda 3 mm – červená, 2 mA
PWR_MCU, FT_VCCIO	S1G20	Oboustranný kolík 2,54 mm – 3 piny + zkratovací propojka JUMP-SW+
R1	1,6 k Ω	Tenkovrstvý rezistor – SMD 0805
R2	750 Ω	Tenkovrstvý rezistor – SMD 0805
R3, R7	10 k Ω	Tenkovrstvý rezistor – SMD 0805
R4	4,7 k Ω	Tenkovrstvý rezistor – SMD 0805
R5, R6	270 Ω	Tenkovrstvý rezistor – SMD 0805
S1	DTS62K	Mikrospínač do DPS – 1 pól
SW1, SW2/3, SW4/5, ATT	MLW10G	Konektor pro ploché kabely do DPS – přímý, 2 \times 5 kontaktů
AMP..., PRG	MLW06G	Konektor pro ploché kabely do DPS – přímý, 2 \times 3 kontakty
XTAL1	HC49/USSMD Q 16,000MHZ	Krystal SMD – 11,5 mm \times 4,8 mm
X1	ARK350/3 Blue	Šroubovací svorkovnice vertikální do DPS modrá – 3 kontakty
X2	USB1X90	Konektor USB A do DPS – zásuvka 90°
<i>Součástky neuvedené ve schématu</i>		
1 ks	Držák na DIN lištu	
4 ks	Distanční sloupek plastový (nylon) M3-5 mm (matice/matice) + spojovací materiál	
2 m*	Plochý kabel 10 žil \times 28AWG – šedý	
10 ks	Konektor pro plochý kabel PFL10 – přímý, 2 \times 5 kontaktů	
4 ks	Konektor pro plochý kabel PFL6 – přímý, 2 \times 3 kontakty	
2 ks	Konektor na kabel pro oboustranný kolík 2,54 mm – 1 kontakt + krimpovací pin	
1 ks	Kabel USB 2.0 A Male/A Male – 1 m	

* Délky jsou pouze orientační, skutečná délka závisí na trase vodiče a umístění zařízení.

E.3 Zesilovač

Tabulka E.6 Seznam součástek – zesilovač.

Označení	Hodnota	Popis
R1	4,3 kΩ	Tenkovrstvý rezistor – SMD 1206
R2, R3	2,4 kΩ	Tenkovrstvý rezistor – SMD 1206
T1	BC817-25	Bipolární NPN tranzistor – SMD SOT-23-3
T2	BC807-25	Bipolární PNP tranzistor – SMD SOT-23-3
X1	ARK350/2 Blue	Šroubovací svorkovnice vertikální do DPS modrá – 2 kontakty
X2	S1G20	Oboustranný kolík 2,54 mm – 2 piny
<i>Součástky neuvedené ve schématu</i>		
1 ks	Širokopásmový zesilovač Mini-Circuits ZX60-V63+	
1 ks	Krabice z Al plechu 1 mm 35 mm × 65 mm × 22 mm s držákem na DIN lištu + spojovací materiál	

E.4 Konektorové desky pro koaxiální přepínače

Tabulka E.7 Seznam součástek – konektorová deska pro koaxiální přepínač Teledyne.

Označení	Hodnota	Popis
X1	D-SUB9	Konektor Canon – 9 pinů, zásuvka (female), do DPS, pravoúhlý
X2	ARK350/2 Blue	Šroubovací svorkovnice vertikální do DPS modrá – 2 kontakty
X3	MLW10G	Konektor pro ploché kabely do DPS – přímý, 2 × 5 kontaktů
<i>Součástky neuvedené ve schématu</i>		
2 ks	Šroub s unifikovaným palcovým závitem – #4-40 × 5/16, křížový Phillips	

Tabulka E.8 Seznam součástek – konektorová deska pro koaxiální přepínač TeleRel.

Označení	Hodnota	Popis
X1	D-SUB15	Konektor Canon – 15 pinů, zásuvka (female), do DPS, pravoúhlý
X2	ARK350/2 Blue	Šroubovací svorkovnice vertikální do DPS modrá – 2 kontakty
X3	MLW10G	Konektor pro ploché kabely do DPS – přímý, 2 × 5 kontaktů
<i>Součástky neuvedené ve schématu</i>		
2 ks	Šroub s unifikovaným palcovým závitem – #4-40 × 5/16, křížový Phillips	

E.5 Filtry

Tabulka E.9 Seznam součástek – dolní propust 1 GHz.

Počet	Popis
2 ks	Koaxiální konektor SMA pro montáž do panelu – JACK GOLD
1 ks	Krabice z pocínovaného plechu 41 mm × 160,5 mm × 31 mm s držákem na DIN lištu + spojovací materiál, viz příloha D.2

Tabulka E.10 Seznam součástek – horní propust 1,1 GHz.

Počet	Popis
2 ks	Koaxiální konektor SMA pro montáž do panelu – JACK GOLD
1 ks	Krabice z pocínovaného plechu 50 mm × 160,5 mm × 31 mm s držákem na DIN lištu + spojovací materiál, viz příloha D.3

Tabulka E.11 Seznam součástek – pásmová zádrž VKV-FM.

Označení	Hodnota	Popis
C1, C9	6,8 pF/50 V	Keramický kondenzátor SMD 0805, RF – High Q
C3, C5, C7	15 pF/100 V	Keramický kondenzátor SMD 0805, RF – High Q
C2, C8	91 pF/250 V	Keramický kondenzátor SMD 0805, RF – High Q
C4, C6	75 pF/250 V	Keramický kondenzátor SMD 0805, RF – High Q
L1, L9	390 nH/ 0,29 A	Cívka SMD 0805, HQ
L3, L5, L7	180 nH/ 0,4 A	Cívka SMD 0805, HQ
L2, L8	30 nH/ 1,2 A	Cívka SMD 0805, HQ
L4, L6	36 nH/ 0,5 A	Cívka SMD 0805, HQ
X1, X2	SMA Female	Koaxiální konektor SMA pro montáž na hranu DPS – JACK 0,062 GOLD
Součástky neuvedené ve schématu		
1 ks	Krabice z Al plechu 1 mm 32 mm × 44 mm × 22 mm s držákem na DIN lištu + spojovací materiál	
4ks	Distanční sloupek kovový (nikl) M3-5 mm (matice/matice) + spojovací materiál	

Tabulka E.12 Seznam součástek – pásmová zádrž LTE 800 a GSM 900.

Označení	Hodnota	Popis
C1, C9	0,7 pF/50 V	Keramický kondenzátor SMD 0603, RF – High Q
C2, C8	10 pF/50 V	Keramický kondenzátor SMD 0603, RF – High Q
C3, C, C7	1,6 pF/250 V	Keramický kondenzátor SMD 0603, RF – High Q
C4, C6	8,8 pF/250 V	Keramický kondenzátor SMD 0603, RF – High Q
L1, L9	47 nH	Vzduchová cívka s mezerou mezi závity vinutá z Cu lakovaného drátu o průměru 0,3 mm
L3, L7	22 nH	
L4	20 nH	

L2, L8	3,3 nH	Vzduchová cívka – jeden závit vinutá z Cu lakovaného drátu o průměru 0,3 mm
L4, L6	3,7 nH	
X1, X2	SMA Female	Koaxiální konektor SMA pro montáž na hranu DPS – JACK 0,062 GOLD
Součástky neuvedené ve schématu		
1 ks	Krabice z pocínovaného plechu 56 mm × 43 mm × 41 mm s držákem na DIN lištu + spojovací materiál, viz příloha D.4	

E.6 Ostatní

Tabulka E.13 Seznam součástek – ostatní

Počet	Popis
42 ks	Koaxiální konektor SMA TELEGÄRTNER J01150A0618 – zástrčka na kabel H155, krimpovací
10 m*	Koaxiální kabel H155 – 50 Ω, Cu licna, PE izolace
2,4 m	Teplem smrštitelná trubička
2 ks	Amphenol 132170-10 adaptér SMA zásuvka female na SMA zásuvku female (50 Ω) pro montáž do panelu
2 ks	Amphenol 202112-10 krytka pro SMA zásuvku
4 ks	Amphenol 242125 adaptér SMA zásuvka female na N zásuvku female (50 Ω) pro montáž do panelu
4 ks	Amphenol 202102 krytka pro N zásuvku
1 ks	Hirose Electric JR16WR-7S(71) kulatá zásuvka (female) sedm pinů, velikost 16
1 ks	Hirose Electric JR16WRC(31) krytka konektoru velikost 16 + řetízek
1 ks	Hirose Electric JR16WP-7P(71) kulatá zástrčka (male) sedm pinů, montáž na kabel, velikost 16
1 ks	Hirose Electric JR16WCC-8(71) svorka na kabel pro JR16WP-7P(71)
1 ks	Nanahoshi Kagaku NJC-207-PF kulatá zástrčka (male) sedm pinů, montáž na kabel, velikost 20
10 m	JZ-500 7G0,5 kabel flexibilní se speciálním PVC pláštěm 7 × 0,5mm ² – licna (AWG20), vnější průměr 6,9 mm, šedý
1 ks	Rezistor 100 Ω/0,5 W
3 ks	Svorka bezšroubová WAGO 222-413
Množství neurčeno	Spojovací materiál M2,5, M3, M4, M5

* Délky jsou pouze orientační, skutečná délka závisí na trase vodiče a umístění zařízení.

F POUŽITÉ MĚŘICÍ PŘÍSTROJE A POMŮCKY

Tabulka E.14 Seznam měřicích přístrojů a pomůcek

Přístroj	Typ	Poznámka
Spektrální analyzátor 9 kHz – 3 GHz	Rohde & Schwarz FSL	VUT
Stejnoseměrný napájecí zdroj	Diametral P230R51D	VUT
Multimetr	UNI-T UT61E (True RMS)	VUT
Multimetr	UNI-T UT30D	VUT
Zátěž	Reostat Metra Blansko 12Ω, 13Ω, 18Ω	VUT
AVR ISP programátor	BiProg (STK500)	
Vývojový kit s mikrokontrolérem	Arduino Nano V3.0 ATmega328	
Spektrální analyzátor 9 kHz – 18 GHz	Rohde & Schwarz FSL	ČTÚ
Real-time spektrální analyzátor 10 Hz – 40 GHz	Rohde & Schwarz FSVR	ČTÚ
Signálový generátor	Rohde & Schwarz SMF 100A	ČTÚ
Vektorový obvodový analyzátor	Rohde & Schwarz ZVL	VUT
Vektorový obvodový analyzátor	Agilent Technologies EC5071C ENA Series	VUT
Dílenské vybavení		Studentská laboratoř UREL
Dílenské vybavení		Dílna ČTÚ OTP Brno